



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN SIMULASI *AXIAL FLUX PERMANENT*
MAGNET MOTOR BLDC 5 KW UNTUK
KENDARAAN LISTRIK**

Herviyandi Herizal
NRP 07111440000001

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN SIMULASI *AXIAL FLUX PERMANENT*
MAGNET MOTOR BLDC 5 KW UNTUK KENDARAAN
LISTRIK**

Herviyandi Herizal
NRP 07111440000001

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND SIMULATION OF 5 KW AXIAL FLUX
PERMANENT MAGNET BLDC MOTOR FOR ELECTRIC
VEHICLES**

Herviyandi Herizal
NRP 07111440000001

Advisor
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul :

“Desain dan Simulasi *Axial Flux Permanent Magnet* Motor BLDC 5 kW untuk Kendaraan Listrik”

adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2018



Herviyandi Herizal
NRP. 0711140000001

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESAIN DAN SIMULASI AXIAL FLUX PERMANENT
MAGNET MOTOR BLDC 5 KW UNTUK
KENDARAAN LISTRIK
TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui

Dosen Pembimbing I



Dimas Anton A., S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19810905 200501 1 002

Dosen pembimbing II



Dedet Candra R., S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 19731119 200003 1 001



Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN DAN SIMULASI *AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET* MOTOR BLDC 5 KW UNTUK KENDARAAN LISTRIK

Herviyandi Herizal
07111440000001

Dosen Pembimbing 1 : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.

Dosen Pembimbing 2 : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Penelitian terhadap kendaraan listrik untuk meningkatkan performa dan keandalan pada motor listrik, komponen elektronika daya, baterai dan controller berkembang sangat pesat. Desain motor listrik yang optimal dengan efisiensi yang tinggi merupakan hal yang paling penting untuk implementasi motor listrik pada kendaraan listrik. Tugas Akhir ini bertujuan untuk mendesain dan mensimulasikan *axial flux permanent magnet* motor BLDC untuk mendapatkan desain motor dengan daya keluaran 5 kW serta analisis terhadap parameter kelistrikan seperti torsi, kecepatan, efisiensi, kerapatan fluks, dan rugi-rugi. Pemodelan motor dilakukan dengan mendapatkan parameter fisik motor melalui perhitungan seperti jumlah *pole*, diameter *core* stator, serta pemilihan jenis material. Parameter fisik yang didapatkan disimulasikan melalui *software Ansys Maxwell* menggunakan fitur *Rmxprt* dan desain *blueprint* melalui *software Solidworks*. Hasil yang didapatkan dari desain *axial flux permanent magnet* motor BLDC 5 kW dengan menggunakan 12 slot stator dan 8 kutub rotor ialah didapatkan torsi sebesar 10,95 Nm dengan rating kecepatan pada 5000 rpm serta efisiensi motor sebesar 94,49%.

Kata Kunci : *Axial Flux Permanent Magnet, Ansys Maxwell, dan Solidworks*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND SIMULATION OF 5 KW AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET BLDC MOTOR FOR ELECTRIC VEHICLES

Herviyandi Herizal
0711144000001

1st Advisor : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
2nd Advisor : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

Research on electric vehicles to improve performance and reliability in electric motors, power electronics components, batteries and controllers is growing rapidly. The design of an optimal electric motor with high efficiency is the most important thing for the implementation of electric motors in electric vehicles. This Final Project purposes to design and simulate axial flux permanent magnet of BLDC motor to obtained motor design with 5 kW output power and analysis on electrical parameters such as torque, speed, efficiency, flux density, and losses motor design is done by obtaining motor physical parameters through calculation such as number of pole, stator core diameter, and selection of material type. The physical parameters obtained are simulated through Ansys Maxwell software using Rmxprt feature and blueprint design through Solidworks software. The results obtained from the design of axial flux permanent magnet motor BLDC 5 kW by using 12 slot stator and 8 pole rotor is obtained torque of 10,95 Nm with a speed rating of 5000 rpm and motor efficiency of 94,49%.

Keywords: Axial Flux Permanent Magnet, Ansys Maxwell, and Solidworks.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian dengan judul **“Desain dan Simulasi Axial Flux Permanent Magnet Motor BLDC 5 kW untuk Kendaraan Listrik”** untuk memenuhi syarat kelulusan pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dimas Anton Asfani dan Bapak Dedet Candra Riawan, atas segala tuntunan dan waktunya dalam membimbing penulis hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.

2. Kedua Orang tua dan keluarga penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.

3. Mas Uta, Mbak Santi, Mas Ridwan dan Mas Wahyudi yang membukakan jalan penulis dan membimbing untuk memahami dan mengerti secara mendalam terkait topik tugas ahir ini.

4. Ghuftron Fawaid dan Arief Cahyadi yang telah membantu penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.

5. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

6. Teman-teman Laboratorium Konversi Energi dan Laboratorium Tegangan Tinggi yang mengingatkan dan mendukung penulis agar penulis bisa wisuda yang ke-118.

7. Teman-teman 2014 yang selama perkuliahan selalu memberikan kesan yang luar biasa.

Penulis berharap laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan penulis pada khususnya. Laporan ini masih jauh dari sempurna, sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca yang bersifat membangun.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi.....	5
BAB 2 MOTOR BLDC AXIAL FLUX DENGAN	
PERMANEN MAGNET	7
2.1 Jenis Motor Penggerak Mobil Listrik	7
2.2 Motor BLDC	8
2.2.1 Perbedaan <i>Axial Flux</i> dengan <i>Radial Flux</i> pada Motor BLDC	9
2.2.2 Persamaan Umum Motor BLDC	10
2.3 Konstruksi Motor Axial Flux Pemanent Magnet	
Motor BLDC	12
2.3.1 Stator.....	13
2.3.2 Rotor	13
2.3.3 <i>Core</i>	14
2.3.4 Permanen Magnet.....	14
2.3.5 <i>Hall Sensor</i>	15
2.4 Prinsip Kerja Motor	15
2.5 Penelitian Sebelumnya	15
2.5.1 Desain dan Analisis Motor <i>Axial Flux Brushless</i> DC Berbasis 3D <i>Finite Element Method</i> untuk Kendaraan Listrik	15

2.5.2	Rancang Bangun dan Uji Performa Motor Listrik <i>Brushless</i> DC <i>Axial Flux</i> dengan Daya 25 kW	16
BAB 3	PERANCANGAN <i>AXIAL FLUX</i> PERMANENT MAGNET MOTOR BLDC	17
3.1	Spesifikasi Desain <i>Axial Flux Permanent Magnet</i> Motor BLDC.....	17
3.1.1	Perhitungan Kebutuhan arus.....	17
3.1.2	Perhitungan <i>Loading Value</i>	20
3.1.3	Perhitungan Diameter <i>Core</i> Stator	20
3.1.4	Perhitungan Nilai Torsi	22
3.1.5	Perhitungan Kerapatan Fluks di <i>Airgap</i>	23
3.1.6	Pemilihan <i>Airgap</i>	23
3.2	Desain Menggunakan <i>Ansys Maxwell</i>	23
3.2.1	Pemodelan dengan Menggunakan Fitur <i>Rmxprt</i> ..	23
3.2.2	Pemodelan Parameter Umum Mesin.....	24
3.2.3	Pemodelan Parameter Stator.....	25
3.2.4	Pemodelan Parameter <i>Winding</i>	28
3.2.5	Penentuan Parameter Sirkuit.....	29
3.2.6	Pemodelan Parameter Rotor	30
3.2.7	<i>Solution Setup</i>	31
3.3	Desain Menggunakan <i>Solidworks</i>.....	31
3.3.1	Pemodelan Stator	32
3.3.2	Pemodelan Rotor.....	34
3.3.3	Pemodelan <i>Shaft</i>	35
3.3.4	Pemodelan Magnet.....	36
3.3.5	Pemodelan <i>Casing</i>	37
3.3.6	<i>Assembly</i> (Penggabungan Desain)	38
BAB 4	HASIL DAN ANALISIS DATA	41
4.1	Hasil Desain Pemodelan <i>Axial Flux Permanent Magnet</i> Motor BLDC.....	41
4.1.1	Desain dan Spesifikasi Stator	41
4.1.2	Desain dan Spesifikasi Rotor.....	44
4.1.3	Desain <i>Assembly</i>	46
4.2	Analisa Hasil Simulasi 2D terhadap Performansi Motor	46
4.3	Analisa Hasil Simulasi 3D <i>Transient</i> Motor.....	49
4.3.1	Karakteristik Arus dan Tegangan Masukan Motor	49

4.3.2	Kurva Karakteristik Torsi terhadap Waktu	51
4.3.3	Karakteristik Kerapatan Fluks.....	52
4.3.4	Karakteristik Arah Medan.....	53
BAB 5	PENUTUP	57
5.1	Kesimpulan.....	57
5.2	Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA		59
LAMPIRAN		61
Lampiran 1.	Blueprint Stator.....	61
Lampiran 2.	Blueprint <i>Winding</i>	62
Lampiran 3.	<i>Blueprint Core Rotor</i>	63
Lampiran 4.	Blueprint <i>Shaft</i>	64
Lampiran 5.	Blueprint Magnet	65
Lampiran 6.	Blueprint Rotor Keseluruhan	66
Lampiran 7.	Blueprint <i>Casing</i>	67
Lampiran 8.	Blueprint Assembly Motor.....	68
RIWAYAT PENULIS.....		69

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Diagram Alir Motor BLDC	3
Gambar 2.1 Klasifikasi Motor Listrik	8
Gambar 2.2 Topologi Tipe Motor BLDC (a) <i>Radial Flux</i> (b) <i>Axial Flux</i>	10
Gambar 2.3 Rangkaian Ekuivalen Motor BLDC.....	10
Gambar 2.4 Kurva Karakteristik Torsi terhadap Kecepatan sebagai Target Kurva TN	12
Gambar 2.5 Ragam Topologi Konstruksi Aksial Fluks Motor BLDC (a) Rotor-Stator Tunggal (b) Rotor-Single Stator Ganda (c) Stator Ganda-Rotor Tunggal (d) <i>Multistage</i> 3 Rotor dan 2 Stator.....	13
Gambar 2.6 Kurva Sifat Kemagnetan pada Logam Steel.....	14
Gambar 3.1 Belitan Stator dirangkai Empat Pararel	18
Gambar 3.2 Perbandingan Diameter Dalam dan Luar <i>Core</i> Stator	22
Gambar 3.3 Diagram Proses Pemodelan dan Simulasi pada Perangkat Lunak <i>Ansys Maxwell</i>	24
Gambar 3.4 Mesin <i>Axial Flux</i>	25
Gambar 3.5 Tipe Sirkuit Wye Tiga Fasa	26
Gambar 3.6 Tipe Slot pada Stator	27
Gambar 3.7 Pemodelan <i>Winding</i>	29
Gambar 3.8 Diagram Alir Pemodelan Menggunakan <i>Solidworks</i>	32
Gambar 3.9 Sketsa Awal <i>Core</i> Stator.....	33
Gambar 3.10 Pembuatan Inti Stator (Kiri) Sketsa Inti Stator (Kanan) Hasil Desain Inti Stator.....	34
Gambar 3.11 Hasil Akhir Desain <i>Core</i> Stator	34
Gambar 3.12 Sketsa Dasar Pemodelan <i>Core</i> Rotor	35
Gambar 3.13 Hasil Akhir Desain <i>Core</i> Rotor.....	35
Gambar 3.14 Hasil Akhir Desain <i>Shaft</i>	36
Gambar 3.15 Sketsa Dasar Desain Magnet	36
Gambar 3.16 Perbanyakan Desain Menggunakan Fitur <i>Circular Sketch Pattern</i>	37
Gambar 3.17 Hasil Akhir Desain Magnet	37
Gambar 3.18 Hasil Akhir Desain <i>Casing</i>	38
Gambar 3.19 Desain Penutup <i>Casing</i> Motor	38

Gambar 3.20 Hasil Akhir Desain Setelah Melalui Proses <i>Assembly</i>	39
Gambar 4.1 Desain Stator dengan <i>Solidworks</i>	41
Gambar 4.2 Desain Stator dengan <i>Ansys Maxwell</i>	42
Gambar 4.3 Konstruksi Slot Stator	43
Gambar 4.4 Desain Rotor dengan <i>Solidworks</i>	44
Gambar 4.5 Desain Rotor dengan <i>Ansys Maxwell</i>	45
Gambar 4.6 Desain <i>Assembly</i> menggunakan <i>Solidworks</i>	46
Gambar 4.7 Desain <i>Assembly</i> menggunakan <i>Ansys Maxwell</i>	46
Gambar 4.8 Kurva Karakteristik Efisiensi, Kecepatan Arus dan Daya terhadap Pembebanan	47
Gambar 4.9 Kurva Tegangan terhadap Waktu Selama 10 ms	50
Gambar 4.10 Kurva Arus terhadap Waktu Selama 10 ms	50
Gambar 4.11 Torsi terhadap Waktu Selama 10 ms	51
Gambar 4.12 Simulasi Kerapatan Fluks saat 5 ms	52
Gambar 4.13 Simulasi Kerapatan Fluks saat 15 ms	53
Gambar 4.14 Simulasi Kerapatan Fluks saat 30 ms	53
Gambar 4.15 Simulasi Arah Medan saat 5 ms	54
Gambar 4.16 Simulasi Arah Medan saat 15 ms	54
Gambar 4.17 Simulasi Arah Medan saat 30 ms	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data Spesifikasi Desain Motor 25 kW.....	16
Tabel 2.2 Data Spesifikasi Desain dan Implementasi Motor 25 kW	16
Tabel 3.1 Parameter Dasar Motor	17
Tabel 3.2 Kombinasi Slot dan <i>Pole</i>	18
Tabel 3.3 Ukuran Kawat Tembaga berdasarkan <i>American Wire Gauge</i> (AWG).....	19
Tabel 3.4 Perbandingan Luas Penampang dengan Jumlah Lilitan	20
Tabel 3.5 Karakteristik <i>Axial Flux Permanent Magnet</i> Berdasarkan Perbedaan Jumlah <i>Pole</i>	21
Tabel 3.6 Parameter Umum Mesin	25
Tabel 3.7 Parameter Umum Stator.....	26
Tabel 3.8 Parameter Tipe Slot pada Stator	27
Tabel 3.9 Parameter <i>Core</i> Stator.....	28
Tabel 3.10 Parameter <i>Winding</i>	28
Tabel 3.11 Parameter Sirkuit	30
Tabel 3.12 Parameter <i>Core</i> Rotor	30
Tabel 3.13 Parameter Magnet	31
Tabel 4.1 Data Spesifikasi Stator	42
Tabel 4.2 Data Spesifikasi Slot Stator.....	43
Tabel 4.3 Data Spesifikasi <i>Winding</i> Stator.....	44
Tabel 4.4 Data Spesifikasi <i>Core</i> Rotor.....	45
Tabel 4.5 Data Spesifikasi Magnet	45

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor BLDC saat ini sudah banyak digunakan dan diaplikasikan pada bidang industri peralatan rumah tangga, industri peralatan kesehatan hingga industri otomotif yang berfokus pada pengembangan kendaraan listrik (*Electric Vehicles*) dikarenakan karakteristik kecepatan torsi yang sangat baik, memiliki efisiensi yang tinggi dan biaya pemeliharaan yang terjangkau, seiring dengan perkembangan teknologi pada kendaraan listrik, para peneliti sebagian besar terdorong untuk meningkatkan performa dan efisiensi untuk meningkatkan keandalan kendaraan listrik. Komponen utama yang banyak diteliti yaitu *controller*, kapasitas baterai, komponen elektronika daya hingga motor listrik. Oleh karena itu, perlu dilakukannya desain motor listrik dengan tujuan memperoleh performa dan efisiensi yang terbaik [1]-[2].

Motor BLDC terus mengalami perkembangan dan terus diteliti seiring ditemukannya penggunaan motor *permanent magnet* BLDC yang memiliki keunggulan sebagai penggerak kendaraan listrik yaitu ukuran yang ringan, *low cost*, torsi yang tinggi serta efisiensi yang tinggi [3].

Motor BLDC memiliki dua tipe permanen magnet yaitu *axial flux permanent magnet* (AFPM) dan *radial flux permanent magnet* (RFPM). Banyak penelitian yang telah membandingkan performansi dari kedua tipe permanen magnet tersebut, dimana AFPM memiliki keunggulan dari sisi kekuatan penarikan beban, *airgap*, torsi, berat lebih ringan serta pembuangan panas lebih baik dibandingkan RFPM [4]-[5].

Oleh sebab itu pada Tugas Akhir bertujuan untuk mendesain dan mensimulasikan motor BLDC dengan menggunakan *axial flux permanent magnet* dengan keluaran daya sebesar 5 kW sehingga mendapatkan parameter serta analisis yang diharapkan yaitu berupa kekuatan permanent magnet yang akan digunakan, jumlah kumparan stator yang akan dibelitkan, banyaknya konfigurasi stator dan rotornya, kerapatan fluks, kuat medan, rugi-rugi, kecepatan,

torsi, daya keluaran serta efisiensi dan dimensi motor sehingga dapat dijadikan acuan untuk implementasi pada kendaraan listrik.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang dibahas pada Tugas Akhir ini yaitu :

1. Bagaimana mendesain *axial flux permanent magnet* motor BLDC dengan daya keluaran 5 kW.
2. Analisa parameter kelistrikan dari desain *axial flux permanent magnet* motor BLDC dengan daya keluaran 5 kW.

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan yang akan dibatasi dalam Tugas Akhir ini ialah sebagai berikut :

1. Desain dan simulasi menggunakan perangkat lunak *Solidworkss* dan *Ansys Maxwell*.
2. Tugas Akhir ini hanya membahas analisis parameter kelistrikan dan desain *axial flux permanent magnet* motor BLDC.
3. Ada beberapa parameter *constraint* yang mengacu pada kendaraan listrik GESITS.
4. Tugas Akhir ini tidak membahas mengenai implementasi *axial flux permanent magnet* motor BLDC maupun sistem kontrol yang ada didalamnya.

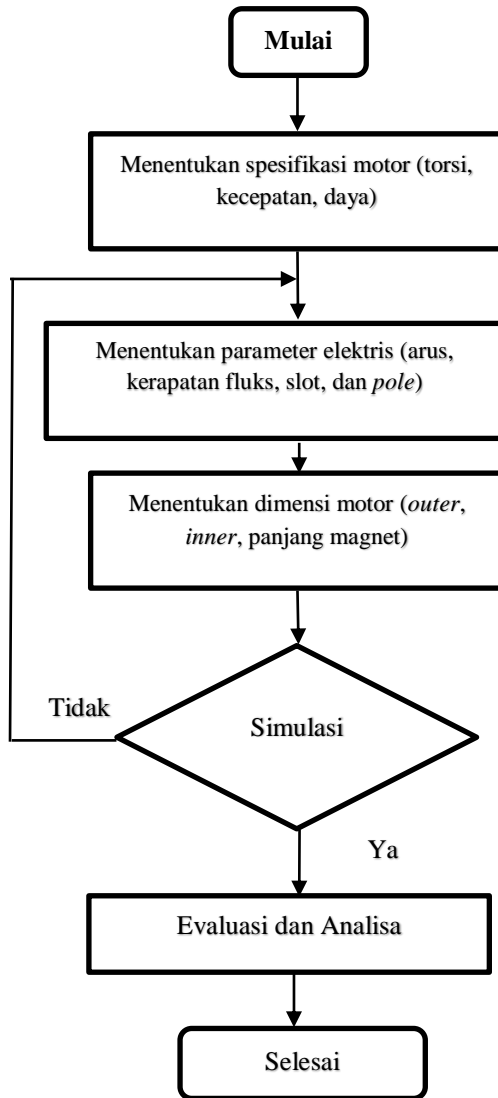
1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari Tugas Akhir ini ialah sebagai berikut :

1. Mendapatkan desain *axial flux permanent magnet* motor BLDC dengan daya keluaran 5 kW.
2. Mengetahui pengaruh dari parameter kelistrikan yang dihasilkan oleh *axial flux permanent magnet* motor BLDC.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dari Tugas Akhir ini dapat dilihat pada diagram alir pada gambar 1.1 dibawah ini :



Gambar 1.1 Diagram Alir Motor BLDC

1. Studi Literatur
Pada tahap ini dilakukan kajian untuk mempelajari literatur maupun pustaka baik itu diambil dari buku, jurnal ilmiah, prosiding dan tugas akhir sebelumnya yang berkaitan tentang *fundamental axial flux permanent magnet* motor BLDC dan penentuan desain motor yang optimal untuk mendapatkan parameter kelistrikan seperti torsi, daya keluaran, kecepatan, kerapatan fluks dan rugi-rugi.
2. Perancangan dan Perhitungan Parameter Desain Motor
Dilakukan perancangan desain *axial flux permanent magnet* motor BLDC dengan menentukan parameter fisik motor yaitu, jumlah slot pada stator, jumlah *pole* pada rotor, banyaknya lilitan untuk *winding*, rating kecepatan dan torsi. Selanjutnya dilakukan perhitungan terhadap desain motor sehingga diperoleh parameter yang sesuai untuk mendapatkan daya keluaran dengan efisiensi yang optimal.
3. Desain dan Simulasi Motor
Dilakukan proses desain dengan menggunakan perangkat lunak *Solidworkss* untuk menghasilkan *blueprint* (cetakan) *axial flux permanent magnet* motor BLDC. Selain itu, dilakukan proses desain dengan menggunakan perangkat lunak *Ansys Maxwell* dengan memasukkan parameter fisik yang telah dihitung. Selanjutnya melalui perangkat lunak *Ansys Maxwell* tersebut dapat dilakukan simulasi terhadap kinerja motor untuk mendapatkan parameter kelistrikan seperti torsi, daya keluaran, efisiensi, rugi-rugi, kerapatan fluks, kuat medan dan kecepatan dari motor tersebut.
4. Analisa Data
Analisa dilakukan terhadap hasil simulasi yang diperoleh yaitu, torsi, daya keluaran, efisiensi, rugi-rugi, kerapatan fluks, kuat medan dan kecepatan.
5. Penyusunan Laporan
Penyusunan laporan dari seluruh kegiatan yang dilakukan dari Tugas Akhir ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan laporan penelitian ini dapat dijelaskan dengan sistematika sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan dan relevansi dari Tugas Akhir yang dilakukan.

BAB 2 MOTOR BLDC AXIAL FLUX DENGAN PERMANEN MAGNET

Pada bab ini dibahas mengenai dasar teori yang dapat menunjang topik pada Tugas Akhir yang diambil. Pembahasan teori yang diambil seperti *fundamental axial flux permanent magnet* motor BLDC, konstruksi motor, dan prinsip kerja.

BAB 3 PERANCANGAN AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MOTOR BLDC

Pada bab ini dibahas mengenai langkah-langkah untuk mendesain motor melalui perancangan dan perhitungan untuk menentukan parameter fisik motor. Selain itu dilakukan juga desain melalui perangkat lunak untuk mendapatkan hasil simulasi dan *blueprint* dari desain motor.

BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini dibahas mengenai hasil dari simulasi desain yang diperoleh dari perancangan dan perhitungan desain serta dilakukan analisis parameter kelistrikan pada hasil simulasi tersebut.

BAB 5 PENUTUP

Pada bab ini dibahas mengenai kesimpulan yang dapat ditarik dari perancangan, perhitungan, desain dan hasil simulasi dari desain motor. Pada bab ini juga membahas mengenai saran yang dapat diberikan untuk memberikan perbaikan untuk penelitian selanjutnya dan menjadikan acuan untuk penelitian berikutnya dalam hal desain hingga implementasi *axial flux permanent magnet* motor BLDC.

1.7 Relevansi

Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu :

1. Menjadi referensi yang dapat digunakan untuk fabrikasi *axial flux permanent magnet* motor BLDC 5 kW untuk diterapkan pada kendaraan listrik.
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan mengerjakan penelitian dengan topik desain, simulasi, dan fabrikasi *axial flux permanent magnet* motor BLDC.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

MOTOR BLDC AXIAL FLUX DENGAN PERMANEN MAGNET

Seiring perkembangan beragam penelitian untuk meningkatkan performa pada kendaraan listrik, dimana penelitian tersebut banyak berfokus pada sistem *controller*, komponen elektronika daya kapasitas baterai, performa motor listrik sebagai pendorong utamanya dan komponen lainnya yang mampu menunjang keandalan kendaraan listrik. Penelitian terhadap motor listrik sangat pesat dilakukan guna mendapatkan efisiensi motor yang optimal.

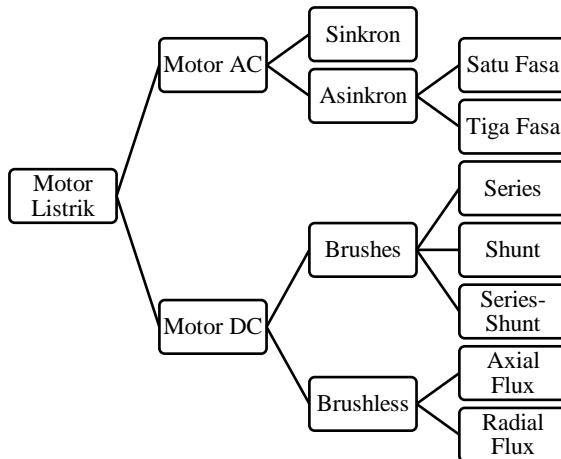
2.1 Jenis Motor Penggerak Mobil Listrik

Banyak jenis dari motor listrik yang digunakan untuk motor penggerak. Dimana motor listrik utamanya dibagi menjadi dua jenis yaitu motor sumber AC dan DC. Untuk motor AC terbagi menjadi motor sinkron dan asinkron. Sedangkan motor DC dibagi menjadi motor *brush* (sikat) dan *brushless* (tanpa sikat). Motor BLDC memiliki karakteristik gelombang trapezoidal. Motor BLDC dalam melakukan eksitasi tidak menggunakan brush namun menggunakan permanen magnet yang terpasang pada rotor. Hal ini menguntungkan dalam konfigurasi *brushless* dikarenakan mengurangi rugi-rugi gesek akibat kontak antara rotor dengan sikat, selain itu juga memudahkan dalam perawatan atau *maintenance*.

Penggunaan motor listrik semakin berkembang apabila dibandingkan dengan motor bakar konvensional, berikut ini merupakan keunggulan dari motor listrik yaitu sebagai berikut :

- a. Hemat dalam perawatan
- b. Tingkat kebisingan yang rendah
- c. Getaran lebih yang dihasilkan rendah
- d. Suara yang dihasilkan halus
- e. Kecepatan putaran motor dapat diatur
- f. Jauh lebih rapih dan bersih

Motor Listrik terbagi menjadi beberapa klasifikasi. pada Gambar 2.1 dapat dilihat klasifikasi pada motor listrik.



Gambar 2.1 Klasifikasi Motor Listrik

2.2 Motor BLDC

Motor *brushless direct current* (BLDC) banyak diaplikasikan pada industri peralatan otomatisasi dan instrumentasi hingga otomotif. Motor BLDC tanpa menggunakan *brushless* (sikat) untuk komutasinya sehingga motor BLDC memiliki banyak keunggulan apabila dibandingkan dengan motor listrik yaitu, memiliki tingkat efisiensinya tinggi, tingkat kebisingannya rendah, tingkat keandalannya tinggi, lama operasi yang panjang, serta biaya *maintenance* yang murah.

Motor BLDC ialah salah satu motor jenis sumber DC yang menggunakan permanen magnet di bagian rotor untuk eksitasinya dan belitan kawat tembaga pada stator. Motor BLDC tidak memiliki *brush* (sikat) untuk eksitasimelainkan permanen magnet yang dijadikan media untuk melakukan eksitasi. Dengan digantikannya fungsi *brush* (sikat) pada motor BLDC maka didapatkan beberapa keuntungan yaitu sebagai berikut:

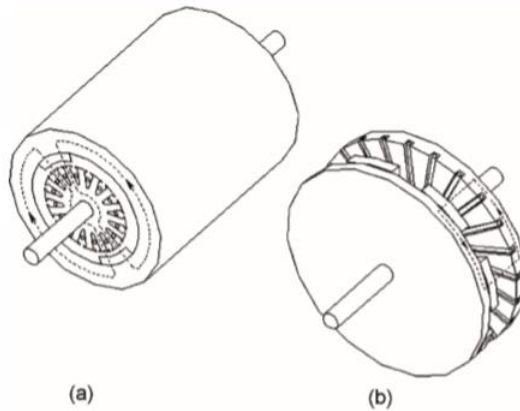
- a. Perawatan yang mudah
- b. Mengurangi rugi-rugi gesek
- c. Memiliki efisiensi yang tinggi
- d. Memiliki faktor daya yang baik
- e. Ukuran motor kecil

2.2.1 Perbedaan Axial Flux dengan Radial Flux pada Motor BLDC

Pada Motor BLDC terdapat dua tipe permanen magnet yaitu, tipe *axial flux* dan *radial flux*. Pada dasarnya desain motor BLDC *axial flux* memiliki kesamaan dengan *radial flux* yang ditandai dengan kesamaan rotor silindris. Dimana penggunaan dua jenis motor tersebut cukup bersaing untuk penerapan pada kendaraan listrik. *Axial flux* memiliki beberapa keunggulan apabila dibandingkan dengan *radial flux*.

Motor BLDC yang menggunakan AFPM (*Axial Flux Permanent Magnet*) dirancang agar dapat digunakan untuk menggantikan RFPM (*Radial Flux Permanent Magnet*). AFPM memiliki bentuk cakram dengan kapasitas tinggi, kerapatan daya yang besar serta torsi yang tinggi. AFPM dikategorikan menjadi tiga tipe *single ended* dan *double ended*. Dimana *single ended* hanya memiliki satu stator dan satu rotor, sedangkan *double ended* memiliki satu rotor dengan dua stator atau satu stator dengan dua rotor. Konfigurasi terbaik pada AFPM ialah dengan menggunakan tipe *single ended* yang dapat meminimalkan berat, volume, hingga biaya pembuatan sehingga mampu untuk mendapatkan kerapatan daya dan torsi yang maksimal. Disamping itu pembuatan AFPM memiliki proses yang lebih mudah [5]. Pada Gambar 2.2 merupakan perbedaan bentuk motor antara RFPM dan AFPM pada motor BLDC. Dimana perbedaan dari keduanya, antara lain :

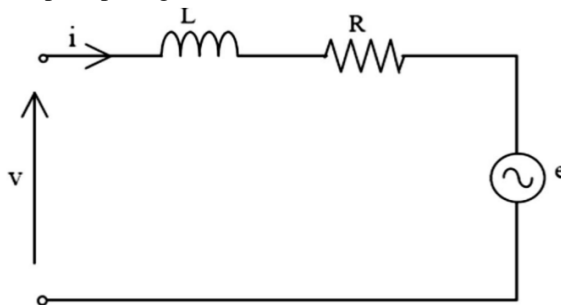
- a. Dengan luasan daya yang sama tipe *axial flux* memiliki berat yang lebih ringan dibandingkan dengan tipe *radial flux*.
- b. *Lifetime* bantalan pada tipe *axial flux* jauh lebih lama dari pada *radial flux* dikarenakan desain tipe *axial flux* memiliki arah aksial terhadap sumbu mesin.
- c. Dengan dimensi yang sama torsi yang didapatkan pada tipe *axial flux* jauh lebih besar dari pada tipe *radial flux* dikarenakan sistem paralel pada tipe *axial flux*.
- d. *Axial flux* sangat cocok untuk dioperasikan pada frekuensi yang maupun kecepatan rendah.



Gambar 2.2 Topologi Tipe Motor BLDC (a) Radial Flux (b) Axial Flux [4]

2.2.2 Persamaan Umum Motor BLDC

Motor BLDC biasanya menggerakkan gelombang tiga fasa. Rangkaian ekivalen setiap fasanya terdiri dari induktansi *winding*, resistansi dan tegangan *back-emf* pada rotor. Rangkaian motor BLDC per fasanya seperti pada gambar berikut.



Gambar 2.3 Rangkaian Ekivalen Motor BLDC [6]

Pada Gambar 2.3 merupakan rangkaian ekivalen dari motor BLDC. Sehingga dengan menggunakan rangkaian ekivalen motor BLDC didapatkan persamaan :

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.1)$$

V adalah Fasa Tegangan

I adalah Fasa Arus

e adalah Tegangan *Back-emf*

L adalah Fasa Induktansi

Motor BLDC juga terdapat tiga fasa sumber pada kumparan dengan persamaan sebagai berikut

$$V_{uv} = R(i_u - i_v) + L \frac{d(i_u - i_v)}{dt} + e_u - e_v \quad (2.2)$$

$$V_{vw} = R(i_v - i_w) + L \frac{d(i_v - i_w)}{dt} + e_v - e_w \quad (2.3)$$

$$V_{wu} = R(i_w - i_u) + L \frac{d(i_w - i_u)}{dt} + e_w - e_u \quad (2.4)$$

Nilai torsi yang diperoleh didapatkan dari nilai daya keluaran pada motor listrik. Daya keluaran pada motor listrik didefinisikan dengan nilai fasa pada tegangan *back-emf* dan fasa arusnya. Berdasarkan daya yang dapat mempresentasikan nilai torsi pada laju kecepatan. Nilai torsi dapat didefinisikan pada persamaan berikut.

$$T = \frac{e_a I_a + e_b I_b + e_c I_c}{\omega} \quad (2.5)$$

T adalah Torsi (Nm)

ω adalah Kecepatan motor (rad/s)

Hubungan antara kecepatan dan torsi dapat didifinisikan pada persamaan berikut

$$\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{Pole}{2} \right) \frac{T - T_{Beban}}{J} \quad (2.6)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

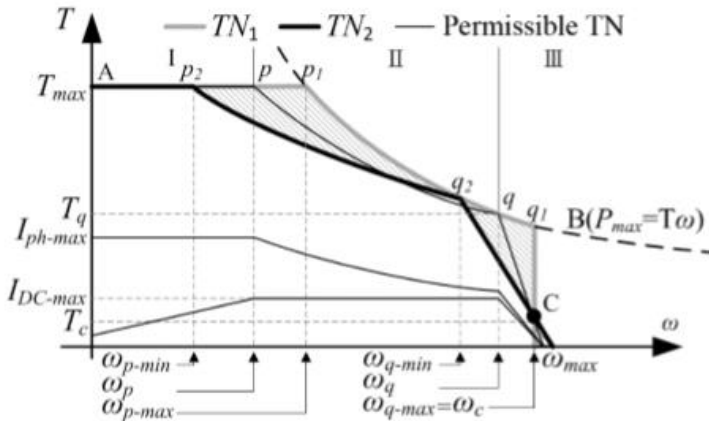
J adalah Inersia

θ adalah Posisi rotor

$$e = \omega \lambda = \omega (iL + \lambda) \quad (2.7)$$

L adalah Induktansi

λ adalah fluks *linkage*



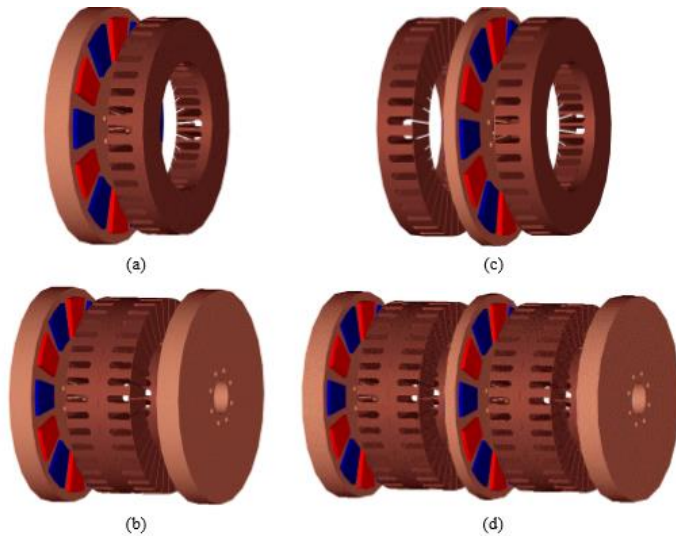
Gambar 2.4 Kurva Karakteristik Torsi terhadap Kecepatan sebagai Target Kurva TN [7]

Pada Gambar 2.4 merupakan kurva TN (torsi dan kecepatan) yang terbagi menjadi tiga zona operasi. Zona pertama ialah torsi konstan, Zona kedua ialah nilai maksimum DC, Zona ketiga ialah tegangan maksimum. Kurva TN dapat diasumsikan dengan mengabaikan nilai induktansi motor, nilai daya dan tegangan tiga fasa.

2.3 Konstruksi Motor Axial Flux Pemanent Magnet Motor BLDC

Industri motor listrik banyak mendominasi dalam motor listrik terutama jenis *axial flux* dikarenakan konstruksinya yang optimal untuk mendapatkan torsi yang tinggi. Pada motor aksial fluks penggunaannya dalam aplikasi terhadap kendaraan listrik dinilai efisien dikarenakan konstruksinya yang mampu memaksimalkan ruang pada kendaraan.

Konstruksi motor aksial fluks terdapat rotor tunggal, rotor ganda, stator tunggal maupun stator ganda yang merupakan variasi yang dapat ditentukan dalam perancangan motor. Setiap variasi memiliki keunggulannya masing-masing, akan tetapi efisiensi yang dihasilkan dari variasi topologi konstruksi motor terbilang tinggi. Pada Gambar 2.5 merupakan ragam topologi konstruksi motor aksial fluks.



Gambar 2.5 Ragam Topologi Konstruksi Aksial Fluks Motor BLDC (a) Rotor-Stator Tunggal (b) Rotor-Single Stator Ganda (c) Stator Ganda-Rotor Tunggal (d) *Multistage* 3 Rotor dan 2 Stator [3]

Ragam topologi dari motor aksial fluks dapat disesuaikan dengan kebutuhan dari kendaraan listrik. Pada penelitian dipilih topologi pada gambar (a) dimana topologi tersebut merupakan bentuk motor yang paling umum dipasaran sehingga mudah untuk implementasinya. Disamping itu, perawatan dan pergerakannya pada topologi tersebut jauh lebih mudah.

2.3.1 Stator

Stator ialah bagian motor yang diam yang berfungsi sebagai medan putar rotor untuk memberikan gaya elektromagnet sehingga rotor dapat berputar. Stator pada motor BLDC terbuat dari dari baja yang terlamnasi yang berfungsi sebagai tempat lilitan kawat. Lilitan kawat pada motor BLDC dihubungkan dengan konfigurasi bintang atau wye.

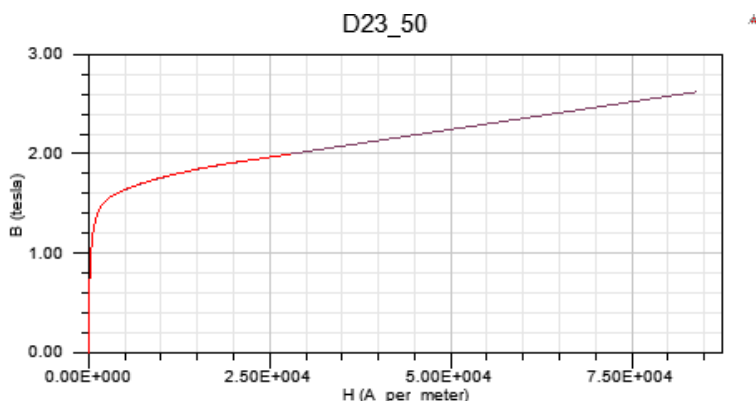
2.3.2 Rotor

Rotor ialah bagian motor yang berputar yang diakibatkan adanya gaya elektromagnet dari stator. Pada motor BLDC bagian rotornya berbeda dengan motor DC yang hanya tersusun atas satu elektromagnet. Sedangkan, motor BLDC tersusun dari beberapa permanen magnet yang

saling direkatkan dan jumlahnya dapat divariasikan. Jumlah kutub magnet berbanding lurus dengan torsi motor namun berbanding terbalik dengan kecepatan, dimana semakin banyak jumlah kutub magnet pada rotor maka semakin tinggi torsi yang dihasilkan namun kecepatannya akan menurun. Selain itu, torsi juga dipengaruhi oleh densitas fluks magnet, dimana semakin besar densitas fluks magnet maka torsi yang dihasilkan menjadi besar.

2.3.3 Core

Core merupakan inti dasar pada stator dan rotor pada motor. *Core* terbuat dari bahan logam yang mampu menghasilkan gaya feromagnetik yang dapat menghasilkan fluks maksimum. Bahan dasar *core* biasanya terbuat dari bahan *steel*. Bahan *steel* memiliki sifat kemagnetan yang sangat baik. Berikut ini merupakan kurva sifat kemagnetan pada bahan logam dengan library D23_50 ditujukan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Kurva Sifat Kemagnetan pada Logam Steel

2.3.4 Permanen Magnet

Permanen magnet memiliki beberapa tipe material. Pada umumnya material dari neodymium seperti NdFeB, NIB maupun magnet neo. NdFeB merupakan gabungan material dari neodymium, Ferit dan Boron. Dimana tingkat daya tarik pada magnet tersebut sangat kuat. Disamping itu NdFeB juga banyak digunakan dalam implementasi motor listrik.

2.3.5 Hall Sensor

Hall Sensor dibutuhkan sebagai sensor yang memberikan informasi kepada kontroler untuk mengatur lilitan kawat yang harus dialiri oleh listrik. *Hall Sensor* merupakan *transducer* yang dapat menghasilkan tegangan yang bervariasi ketika terjadi perbedaan medan magnet. Pada waktu rotor berputar, perubahan medan magnet dari lilitan kawat dideteksi oleh *Hall Sensor* sebagai input kontroler sehingga proses komutasi dapat berjalan secara kontinu.

2.4 Prinsip Kerja Motor

Prinsip kerja dari *axial flux permanent magnet* motor BLDC merupakan teori medan magnet, yaitu saat kutub utara dengan kutub selatan menghasilkan medannya masing-masing maka akan saling tolak menolak dengan kutub sejenis. Dan berlaku pula sebaliknya, dimana kutub yang tidak sejenis akan saling tarik menarik. Sehingga hal inilah yang menimbulkan arus listrik pada kumparan.

2.5 Penelitian Sebelumnya

Pada penelitian terhadap *axial flux permanent magnet* motor BLDC telah dilakukan beberapa penelitian sebelumnya. Berikut merupakan referensi dari penelitian yang dijadikan acuan.

2.5.1 Desain dan Analisis Motor Axial Flux Brushless DC Berbasis 3D Finite Element Method untuk Kendaraan Listrik [8]

Pada penelitian dibahas mengenai desain, simulasi serta analisis terhadap parameter kelistrikan. Desain yang dirancang yaitu *axial flux permanent magnet* motor BLDC dengan daya keluaran sebesar 25 kW dengan torsi sebesar 109 Nm dengan kecepatan 2388 rpm. Berikut merupakan data spesifikasi motor dari penelitian tersebut pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Data Spesifikasi Desain Motor 25 kW

Tipe Motor	<i>Single Sided</i>
Diameter Luar (mm)	220
Diameter Dalam (mm)	104,5
Jumlah Slot Stator	12
Jumlah Kutub	10
Panjang Inti Rotor (mm)	10
Panjang Magnet (mm)	57,75
Ketebalan Magnet (mm)	8
Jenis Material Magnet	NdFe35
Jumlah Lilitan	34
Ketebalan Kawat (mm)	1,02
Jenis Material Belitan	Tembaga

2.5.2 Rancang Bangun dan Uji Performa Motor Listrik *Brushless DC Axial Flux* dengan Daya 25 kW [9]

Pada penelitian ini dibahas mengenai desain, simulasi, implementasi serta pengujian terhadap *axial flux permanent magnet* motor BLDC 25 kW. Penelitian tersebut didapatkan hasil daya keluaran sebesar 24.99 kW dengan torsi maksimum 61.67 Nm. Berikut data spesifikasi dari desain tersebut pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Data Spesifikasi Desain dan Implementasi Motor 25 kW

Tipe Motor	<i>Double Sided Rotor</i>
Diameter Luar (mm)	335
Diameter Dalam (mm)	225
Jumlah Slot Stator	24
Jumlah Kutub	20
Panjang Inti Rotor (mm)	8
Panjang Magnet (mm)	54,75
Ketebalan Magnet (mm)	4
Jenis Material magnet	NdFe35
Jumlah Lilitan	35
Diameter Kawat (mm)	1,537
Jenis Material Belitan	Tembaga

BAB 3

PERANCANGAN *AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET* MOTOR BLDC

3.1 Spesifikasi Desain *Axial Flux Permanent Magnet* Motor BLDC

Langkah pertama dalam merancang *axial flux permanent magnet* motor BLDC yaitu menentukan parameter awal yang hendak dijadikan acuan yang hendak dicapai. Parameter dasarnya ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Dasar Motor

Daya Output	5000 Watt
Tegangan Operasional	100 Volt
Faktor Daya (estimasi)	0,866
Efisiensi (estimasi)	0,95
Jumlah Fasa	3
Kecepatan	5000 rpm

Sehingga dari data parameter acuan diatas dapat dihitung kebutuhan spesifikasi parameter mekanik dan elektrik yang dapat mendukung perhitungan. Ada beberapa parameter yang dijadikan estimasi yaitu faktor daya dan efisiensi untuk mendapatkan luaran daya sebesar 5 kW.

3.1.1 Perhitungan Kebutuhan arus

Kenaikan daya beban sebanding dengan kenaikan arus secara elektrik apabila tegangannya tetap berdasarkan Tabel 3.2 yaitu tabel kombinasi slot dan *pole* [4]. Sehingga dapat ditentukan estimasi nilai faktor daya ($\cos\theta$) dengan slot berjumlah 12 dan *pole* berjumlah 8 yaitu sebesar 0,866.

Tabel 3.2 Kombinasi Slot dan *Pole* [4]

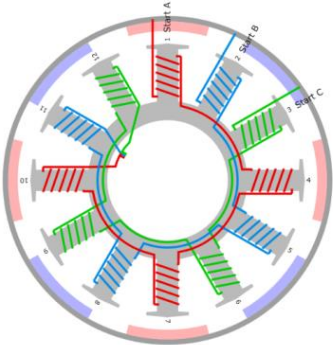
S \ P	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
3	0.866	0.866		0.866	0.866		0.866	0.866		0.866
6		0.866		0.866	0.866		0.866	0.866		0.866
9			0.866	0.945	0.945	0.866	0.945	0.945		0.945
12				0.866	0.966		0.966	0.966		0.866
15					0.866		0.866	0.866		0.866
18						0.866	0.945	0.945		0.945
21							0.866	0.932		0.953
24								0.866		0.866

Berdasarkan Tabel 3.2 didapat nilai faktor daya sebesar 0,866, dengan estimasi efisiensi sebesar 0,95 maka dapat dilakukan perhitungan kebutuhan arus, yaitu sebagai berikut.

$$I = \frac{5000}{100 \times 0,95 \times 0,866}$$

$$I = 60,8 \text{ A}$$

Dengan menggunakan belitan stator 4 kutub seperti yang pada Gambar 3.1, untuk arus sebesar 60,8 A dapat diperkirakan ukuran kawat yang akan digunakan.



Gambar 3.1 Belitan Stator dirangkai Empat Pararel

Belitan Stator akan merasakan arus sebesar 60,8 A, dengan menggunakan Tabel 3.3 yaitu tabel Ukuran Kawat Tembaga *American*

Wire Gauge (AWG) maka didapatkan ukuran kawat tembaga dengan nomor AWG 8 dengan diameter konduktor sebesar 3,26 mm dan arus maksimal 73 A yang sudah termasuk penambahan *safety factor* lebih dari 15% yang diharapkan mampu untuk menangani saat terjadi *transient*.

Tabel 3.3 Ukuran Kawat Tembaga berdasarkan *American Wire Gauge* (AWG)

AWG <i>Gauge</i>	Diameter Konduktor (mm)	Arus Maksimal untuk <i>Wiring</i> (A)	Frekuensi Maksimal	<i>Breaking Force</i>
1	7,34822	211	325 Hz	2430 lbs
2	6,54304	181	410 Hz	1930 lbs
3	5,82676	158	500 Hz	1530 lbs
4	5,18922	135	650 Hz	1210 lbs
5	4,62026	118	810 Hz	960 lbs
6	4,1148	101	1100 Hz	760 lbs
7	3,66522	89	1300 Hz	605 lbs
8	3,2639	73	1650 Hz	480 lbs
9	2,90576	64	2050 Hz	380 lbs
10	2,58826	55	2600 Hz	314 lbs
11	2,30378	47	3200 Hz	249 lbs
12	2,05232	41	4150 Hz	197 lbs
13	1,8288	35	5300 Hz	150 lbs
14	1,62814	32	6700 Hz	119 lbs
15	1,45034	28	8250 Hz	94 lbs
16	1,29032	22	11 k Hz	75 lbs
17	1,15062	19	13 k Hz	59 lbs
18	1,02362	16	17 kHz	47 lbs
19	0,91186	14	21 kHz	37 lbs
20	0,8128	11	27 kHz	29 lbs

Selanjutnya untuk menentukan jumlah lilitan didapatkan pada dari perbandingan luas penampang dengan jumlah kawat yang dililitkan. Perbandingan dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Perbandingan Luas Penampang dengan Jumlah Lilitan

Jumlah <i>Strands</i>	Luas Penampang mm ²	Maksimal lilitan perslot	AWG <i>Gauge</i>
1	8,36	48	8
4	2,09	48	14
8	1,045	48	17
16	0,5225	48	20

Berdasarkan Tabel 3.4, apabila ukuran *slot type* yang berukuran 30 mm x 14 mm maka luas maksimal *slot type* sebesar 410 mm². Selain itu, dengan faktor *constraint* pada *slot type* maka dipilih jumlah *strands* bernilai 1 untuk AWG *Gauge* 8 dengan maksimal lilitan perslot yaitu 48 lilitan.

3.1.2 Perhitungan *Loading Value*

$$q_i = \frac{3 N_{ph} I_{rms}}{\pi D_i} \quad (3.2)$$

$$q_i = \frac{3 (48)(60,8)}{(3,14) (1,15 \times 10^{-3})}$$

$$q_i = \frac{2188,8}{3,61 \times 10^{-3}}$$

$$q_i = 2425,26 \text{ KA turn/m}$$

q_i adalah *loading value*

N_{ph} adalah jumlah lilitan ditiap fasa

I_{rms} adalah arus yang mengalir pada setiap belitan

D_i adalah diameter kawat konduktor

3.1.3 Perhitungan Diameter *Core Stator*

Untuk memperoleh desain motor yang efektif berdasarkan nilai *pole* yang telah ditentukan. Sehingga dapat ditentukan perbandingan antara diameter dalam (D_s) dengan diameter luar (D_{se}) dari *core* yaitu dengan nilai K_d optimum sebesar 0,48 [5]. Disamping itu untuk menentukan D_{se} maupun D_s , salah satunya harus dibuat *constraint*. Untuk hal ini dipilih diameter dalam yang dibuat *constraint* dengan ukuran diameter 80 mm. Nilai K_d optimum dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Karakteristik *Axial Flux Permanent Magnet* Berdasarkan Perbedaan Jumlah *Pole* [5]

Jumlah <i>Pole</i>	Kerapatan Daya (kW/m ³)	Kerapatan Torsi (Nm/Kg)	Berat (Kg)	Kd Optimum (D_s/D_{se})
2	72.3	0.383	3.14	0.3
4	111.3	0.577	2.1	0.4
6	134.2	0.705	1.7	0.46
8	148.7	0.776	1.55	0.48
10	158.5	0.832	1.44	0.5
12	165.2	0.867	1.38	0.51

Dari persamaan Kd dari diperoleh nilai parameter :

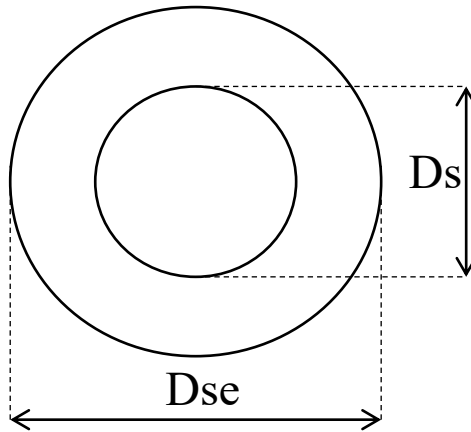
$$K_d = \frac{D_s}{D_{se}} \quad (3.3)$$

$$K_d = 0,48$$

$$D_{se} = (0,48)(80) = 166 \text{ mm}$$

Maka didapat parameter berikut

- R_{in} (jari-jari dalam) = $0,5 \times 80 = 40 \text{ mm}$
- R_{out} (jari-jari luar) = $0,5 \times 166 = 83,5 \text{ mm}$
- Lebar *core* = $83,5 - 40 = 43,5 \text{ mm}$



Gambar 3.2 Perbandingan Diameter Dalam dan Luar *Core* Stator

3.1.4 Perhitungan Nilai Torsi

Penentuan nilai torsi dapat dihitung dengan mengestimasi kecepatan berkisar 5000 rpm. Sehingga pada motor 5 kW akan mengalir torsi dengan perhitungan berikut.

$$f = \frac{5000 \text{ rpm}}{60 \text{ detik}}$$

$$f = 83,33 \text{ Hz}$$

Frekuensi yang dihasilkan pada kecepatan 5000 rpm yaitu berkisar 83.33 Hz. Sehingga dapat diketahui kecepatan sudut sebesar pada perhitungan sebesar:

$$\omega = 2 (3,14)(83,33)$$

$$\omega = 523,33 \text{ rad/s}$$

Kecepatan sudut didapatkan sebesar 523,33 rad/s sehingga dapat dihitung nilai torsi sebesar

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (3.5)$$

$$T = \frac{5000 \text{ watt}}{523,33 \text{ rad/s}}$$

$$T = 9,55 \text{ Nm}$$

Torsi yang didapatkan dari hasil perhitungan dengan daya motor 5 kW dan kecepatan 5000 rpm ialah sebesar 9,55 Nm.

3.1.5 Perhitungan Kerapatan Fluks di *Airgap*

$$T = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \pi \cdot B_g \cdot q_i \cdot R_o^3 \cdot K_r (1 - K_r^2) \quad (3.6)$$

$$B_g = \frac{T}{\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \pi \cdot q_i \cdot R_o^3 \cdot K_r (1 - K_r^2)} \quad (3.7)$$

T adalah torsi

B_g adalah kerapatan fluks

q_i adalah *loading value*

R_o adalah jari-jari lingkaran luar (m)

K_r adalah perbandingan jari-jari lingkaran dalam dan luar

$$B_g = \frac{9.55}{\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (3,14) (2425,26) (10^3) (0,083)^3 (0,48)(1-0,48^2)}$$

$$B_g = 4,19 \times 10^{-3} \text{ Tesla}$$

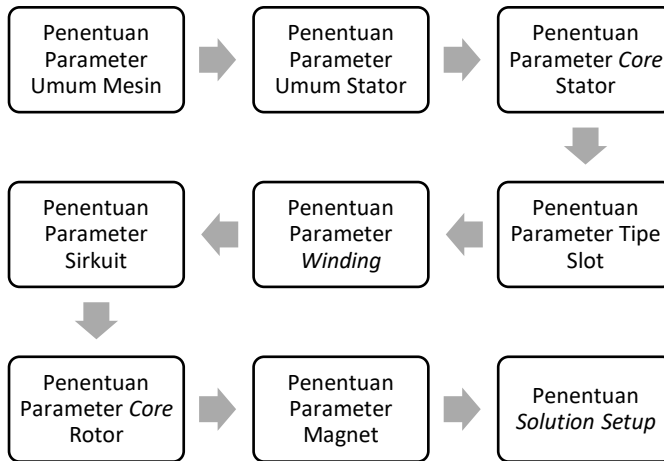
3.1.6 Pemilihan *Airgap*

Dalam penentuan *airgap* atau celah udara perlu memperhatikan besarnya rumah lilitan. Sehingga mendapatkan hasil celah udaranya yang optimal. Berdasarkan penelitian [1],[10], bahwa *airgap* 1 mm dapat membuat nilai kerapatan medan pada *airgap* lebih tinggi apabila dibandingkan dengan *airgap* yang lebih lebar dalam kondisi desain yang sama.

3.2 Desain Menggunakan *Ansys Maxwell*

3.2.1 Pemodelan dengan Menggunakan Fitur *Rmxprt*

Pemodelan melalui modul dalam fitur *rotational machine expert* (*Rmxprt*) dapat digunakan untuk merancang sekaligus mensimulasikan desain mesin listrik sehingga memudahkan pengguna untuk menganalisisnya. Berikut merupakan diagram alir proses pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak *Ansys Maxwell* dapat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram Proses Pemodelan dan Simulasi pada Perangkat Lunak *Ansys Maxwell*

Pada diagram alir tersebut dapat digambarkan proses dari pemodelan dan simulasi. Pemodelan dan simulasi dimulai dari penentuan parameter umum mesin, untuk parameter umum mesin, stator, *core* stator, slot, *winding*, *core* rotor, dan *solution setup*.

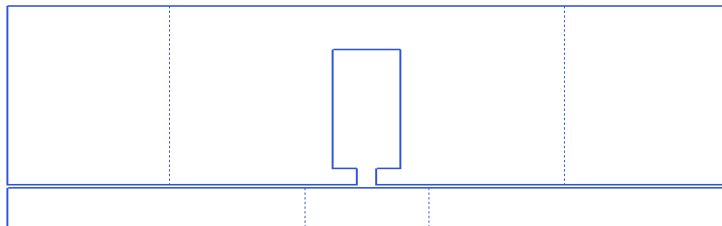
3.2.2 Pemodelan Parameter Umum Mesin

Tahap pertama dalam pemodelan melalui *Ansys Maxwell* ialah penentuan parameter umum mesin berupa tipe sumber masukan, struktur motor, tipe stator, tipe rotor, pemilihan rotor ataupun stator ganda dan panjang *airgap*. Berikut tabel parameter umum mesin dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Parameter Umum Mesin

Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
Tipe Sumber	DC		Sumber AC atau DC untuk menghantarkan energi listrik
Struktur	Axial Flux Rotor		<i>Inner</i> rotor, <i>outer</i> rotor atau <i>axial flux</i> rotor
Tipe Stator	AXIAL_AC		Tipe <i>core</i> stator
Tipe Rotor	AXIAL_PM		Tipe <i>core</i> rotor
<i>Double-Sided</i>	Tidak		Pemilihan untuk rotor ataupun stator ganda
Panjang <i>Airgap</i>	1	mm	Panjang <i>airgap</i> antara <i>core</i> stator dan rotor

Berdasarkan Tabel 3.6 diketahui bahwa motor memiliki karakteristik dengan menggunakan tipe sumber DC, struktur motor menggunakan *axial flux*, tidak menggunakan *double-sided* pada sisi rotor maupun stator serta memiliki panjang air gap sebesar 1 mm. Berikut ini ialah bentuk umum pada motor dengan panjang *airgap* 1 mm. Pada Gambar 3.4 ditunjukkan desain dasar mesin *axial flux*.



Gambar 3.4 Mesin *Axial Flux*

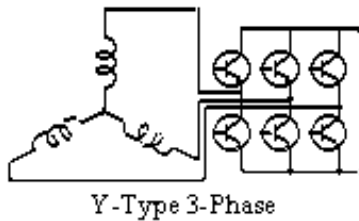
3.2.3 Pemodelan Parameter Stator

Tahap selanjutnya ialah penentuan parameter pada stator. Parameter yang ditentukan berupa parameter umum stator, parameter *core* stator, dan parameter slot stator. Berikut merupakan tabel parameter umum stator yang ditunjukkan pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Parameter Umum Stator

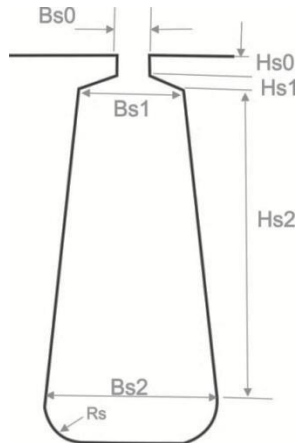
Nama	Nilai	Keterangan
Jumlah <i>Pole</i>	8	Jumlah dari <i>pole</i>
Jumlah Slot	12	Jumlah dari slot pada <i>core</i>
Tipe Sirkuit	Y3	Tipe Sirkuit wye atau delta
Tipe Slot	3	Tipe slot pada <i>core</i> stator
Posisi Kontrol	Ya	

Pada Tabel 3.7 tersebut diketahui bahwa stator yang digunakan memiliki jumlah slot 12 pada stator dan *pole* berjumlah 8 pada rotor, stator menggunakan tipe sirkuit untuk rangkaiannya jenis *wye* tiga fasa (Y3), jumlah *pole* dan slot merupakan salah satu faktor *constraint* yang dipilih berdasarkan banyaknya komposisi tersebut digunakan dipasaran dan tingkat faktor *winding* yang baik bernilai 0.866.



Gambar 3.5 Tipe Sirkuit Wye Tiga Fasa

Pada Gambar 3.5 merupakan tipe sirkuit pada rangkaian kontrol stator dengan tipe *wye* tiga fasa. Berikutnya ialah pemilihan slot stator dengan tipe 3 seperti pada Gambar 3.6 yang merupakan tipe slot optimal yang dapat meningkatkan efisiensi motor [11].



Gambar 3.6 Tipe Slot pada Stator

Penentuan parameter ukuran pada slot merupakan faktor *constraint* berdasarkan keterbatasan alat cetak yang dimiliki, sehingga ukuran pada slot yang didapatkan ialah sesuai dengan Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Parameter Tipe Slot pada Stator

Nama	Nilai	Satuan
Hs0	4	mm
Hs1	0	mm
Hs2	30	mm
Bs0	4	mm
Bs1	14	mm
Bs2	14	mm
Rs	0	mm

Penentuan parameter selanjutnya ialah parameter *core* stator dengan diameter luar *core* sebesar 166 mm dan diameter dalam *core* sebesar 80 mm. Diameter dalam merupakan faktor *constraint* dikarenakan alat cetak untuk laminasi memiliki lingkaran diameter dalam yang tetap dan hanya dapat diatur diameter luar berdasarkan hasil perhitungan antara perbandingan diameter dalam dan diameter luar. Berikut ialah parameter dari *core* stator yang ditunjukkan pada Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Parameter *Core* Stator

Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
Diameter Luar	166	mm	Diameter luar pada <i>core</i> stator
Diameter Dalam	80	mm	Diameter dalam pada <i>core</i> stator
Panjang	45	mm	Tebal <i>core</i> stator
<i>Stacking Factor</i>	0,95		
Tipe Material	D23_50		Tipe material yang digunakan

Pada parameter *core* stator dapat dipilih tipe material logam untuk laminasi *core*. Pada *core* dipilih tipe material dengan kode *library* D23_50 yang memiliki kerapatan massa sebesar 7820.

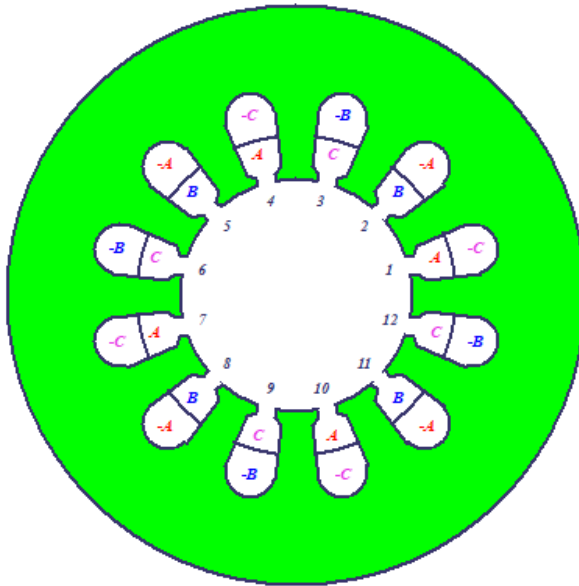
3.2.4 Pemodelan Parameter *Winding*

Pada penentuan parameter *winding* berdasarkan perhitungan yang telah diperoleh *pararel branches* 4 cabang dengan jumlah lilitan sebanyak 48 lilitan dan jumlah *strands* (lilitan kawat) sebanyak 8. Disamping itu dipilih tipe material konduktor dengan jenis *copper* dengan kerapatan massa sebesar 8933 dengan diameter 3,26 mm. Berikut parameter *winding* pada stator yang ditujukan pada Tabel 3.10.

Tabel 3.10 Parameter *Winding*

Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
Tipe <i>Winding</i>	<i>Whole-Coiled</i>		Tipe Kumparan stator
<i>Pararel Branches</i>	4		Jumlah cabang <i>pararel</i> dari <i>winding</i> stator tiap fasa
Jumlah Lilitan	48		Jumlah lilitan stator
Jumlah <i>Strands</i>	1		Jumlah kawat perkonduktor
<i>Wire Wrap</i>	0,2	mm	Ketebalan bungkus kawat
<i>Wire Size</i>	3,26	mm	Ukuran diameter kawat
Tipe Konduktor	<i>Copper</i>		Tipe material kawat

Pada parameter *winding* didapatkan konfigurasi untuk desain pengawatan pada *axial flux permanent magnet motor* BLDC. Desain pengawatannya seperti pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Pemodelan *Winding*

3.2.5 Penentuan Parameter Sirkuit

Pada penentuan parameter sirkuit dipilih tipe kontrol *chopping current control* (CCC). Tipe CCC mampu membatasi arus maksimum dan minimum yang mengalir pada kumparan sehingga nilai torsi dan arus yang diperoleh tidak melebihi kapasitas tahanan pada kumparan. Arus maksimum yang dapat dilalui oleh kumparan di pasang pada nilai 240 A dan arus minimalnya pada 5 A. Berikut merupakan parameter penentuan yang ditujukan pada Tabel 3.11.

Tabel 3.11 Parameter Sirkuit

Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
Tipe Kontrol	CCC		<i>Chopping current control</i> (CCC) membatasi arus maksimum dan minimum pada kumparan
Transistor <i>Drop</i>	0,7	V	<i>Drop</i> tegangan pada transistor
Dioda <i>Drop</i>	0,7	V	<i>Drop</i> tegangan pada dioda
Arus Maksimum	240	A	Arus maksimum untuk CCC
Arus Minimum	5	A	Arus minimum untuk CCC

3.2.6 Pemodelan Parameter Rotor

Pada penentuan parameter rotor terdapat penentuan terhadap parameter *core* rotor dan parameter magnet. Dalam parameter *core* rotor terdapat penentuan jumlah *pole*, diameter dalam dan diameter luar, serta tipe material *core* rotor. Berikut parameter *core* pada rotor yang ditunjukkan pada Tabel 3.11.

Tabel 3.12 Parameter *Core* Rotor

Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
Jumlah <i>Pole</i>	8		Jumlah <i>pole</i> pada rotor
Diameter Luar	166	mm	Diameter luar <i>core</i> rotor
Diameter Dalam	25	mm	Diameter dalam <i>core</i> rotor
Panjang	10	mm	Ketebalan <i>core</i> rotor
<i>Stacking Factor</i>	0,95		
Tipe Material	D23_50		Jenis material
<i>Skew Width</i>	0,2	deg	

Tipe material yang dipilih untuk *core* rotor yaitu material dengan kode *library* D23_50 dengan kerapatan massa sebesar 7820. Selanjutnya ialah penentuan parameter magnet. Magnet yang digunakan merupakan faktor *constraint* dengan ukuran yang tersedia pada pasaran. Jenis magnet yang digunakan ialah tipe NdFe35 yang merupakan jenis magnet dengan sifat medan magnet yang kuat [3]-[4]. Magnet yang

dipilih memiliki ukuran panjang sebesar 28 mm dengan ketebalan 5 mm. Berikut parameter pada magnet yang ditunjukkan pada Tabel 3.11.

Tabel 3.13 Parameter Magnet

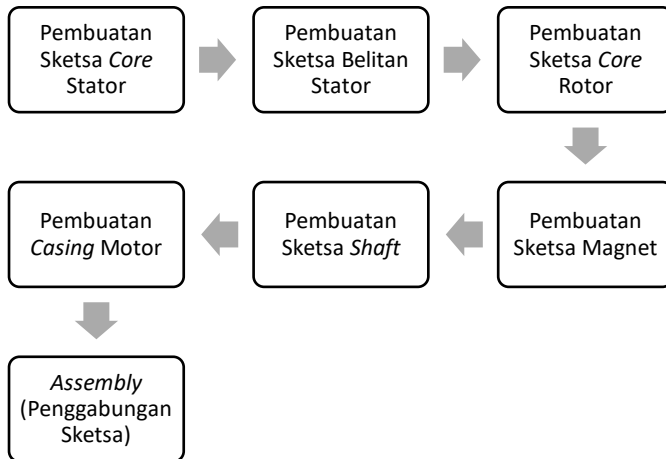
Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
Tipe Magnet	NdFe35		Bahan material yang digunakan
Panjang Magnet	28	mm	
Tebal Magnet	5	mm	

3.2.7 *Solution Setup*

Tahap terakhir pada simulasi melalui *Ansys Maxwell* ialah *solution setup*. Pada tahap ini dapat ditentukan lama waktu yang diperlukan untuk mensimulasikan desain. Tahap ini akan dimulai dari simulasi dua dimensi terlebih dahulu setelah membutuhkan waktu untuk dapat menyelesaikan simulasi pada simulasi tiga dimensi.

3.3 Desain Menggunakan *Solidworks*

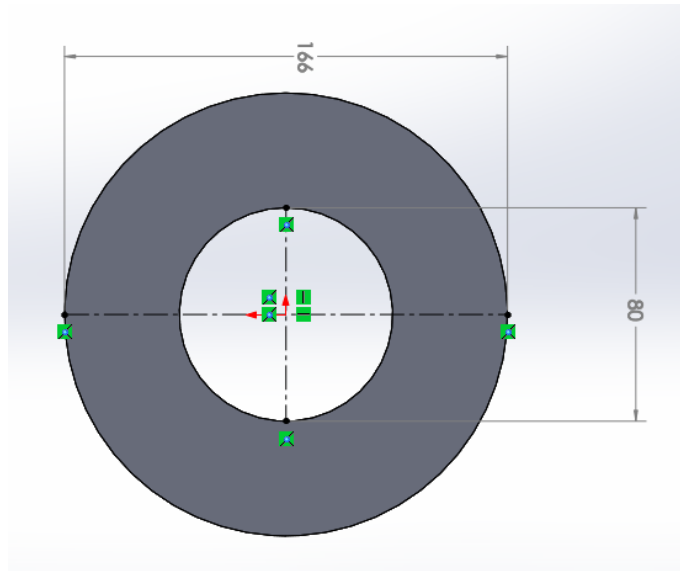
Dalam pemodelan secara mekanik dari parameter yang telah dihitung dapat dilakukan pemodelan *axial flux permanent magnet* motor BLDC melalui *software Solidworks*. Pemodelan motor untuk mendapatkan hasil *blueprint* dapat dilalui beberapa tahapan pembuatan sketsa yaitu sebagai berikut :



Gambar 3.8 Diagram Alir Pemodelan Menggunakan *Solidworks*

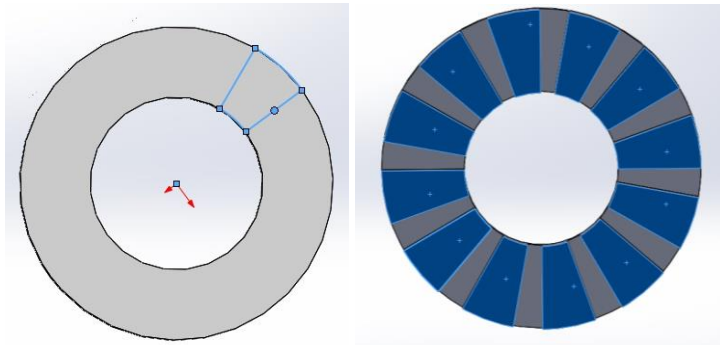
3.3.1 Pemodelan Stator

Dalam pemodelan desain *axial flux permanent magnet* motor BLDC dengan menggunakan *software Solidworks* melalui kerangka dasar dari sketsa dasar. Dengan acuan parameter yang telah dimiliki sketsa dapat disesuaikan dengan parameternya.



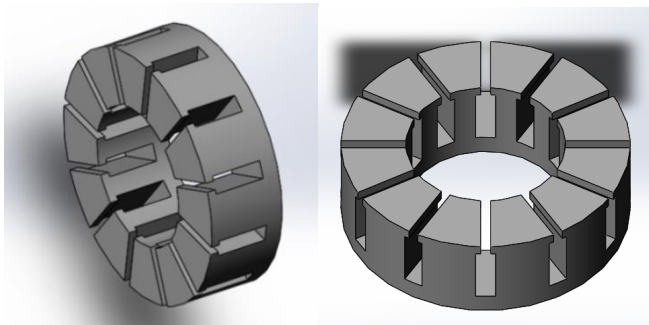
Gambar 3.9 Sketsa Awal *Core Stator*

Pada tahap awal ini, pemodelan dilakukan dengan menyesuaikan diameter dalam dan diameter luar sesuai dengan parameter yang telah dihitung seperti pada Gambar 3.9 yaitu diameter luar sebesar 166 mm dan diameter dalam sebesar 80 mm. Kemudian merancang rumah belitan diatas sketsa dasar, dengan menggunakan fitur *circular sketch pattern* dapat dengan mudah memperbanyak desain rumah belitan dengan jarak putaran yang disesuaikan dengan jumlah slot yang dibutuhkan seperti pada Gambar 3.10. Pada desain tersebut jumlah rumah belitan sebanyak 12 buah.



Gambar 3.10 Pembuatan Inti Stator (Kiri) Sketsa Inti Stator (Kanan) Hasil Desain Inti Stator

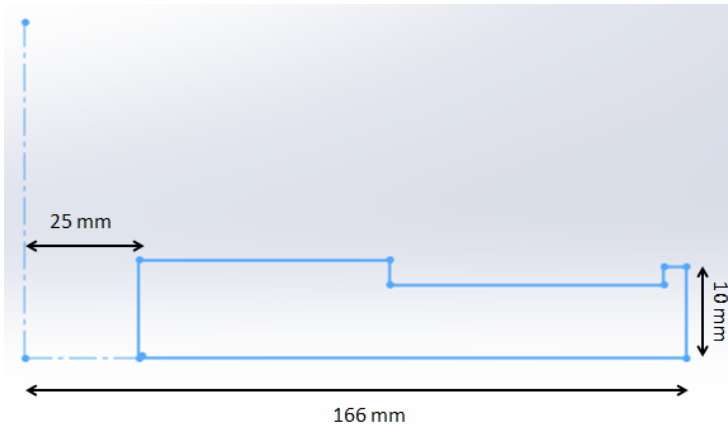
Tahap selanjutnya ialah dengan menggunakan fitur *extrude* pada *Solidworks* maka akan membuat desain sketsa dasar menjadi bentuk 3 Dimensi. Sehingga diperoleh desain akhir stator seperti pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Hasil Akhir Desain *Core* Stator

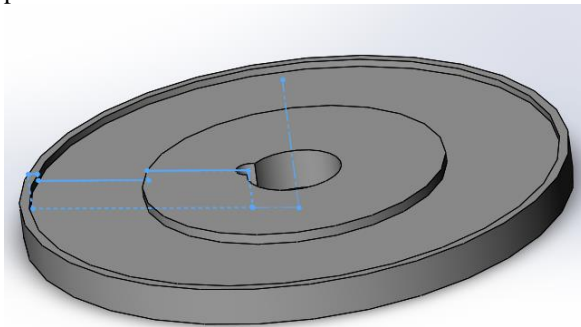
3.3.2 Pemodelan Rotor

Tahap awal untuk pemodelan rotor melalui *software Solidworks* ialah dengan desain dasar berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Parameter rotor berupa diameter luar sebesar 166 mm, diameter dalam sebesar 25 mm dan ketebalan rotor sebesar 10 mm. Tahap awal ditujukan pada Gambar 3.12



Gambar 3.12 Sketsa Dasar Pemodelan *Core Rotor*

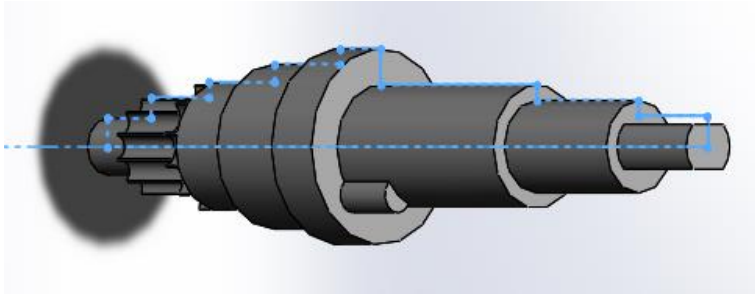
Kemudian dengan menggunakan fitur *revolve* maka sketsa 2D akar diputar dengan sumbu vertikal sebesar 360^0 untuk memperoleh hasil 3 dimensinya. Sehingga akan diperoleh hasil desain dari *core rotor* seperti pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Hasil Akhir Desain *Core Rotor*

3.3.3 Pemodelan *Shaft*

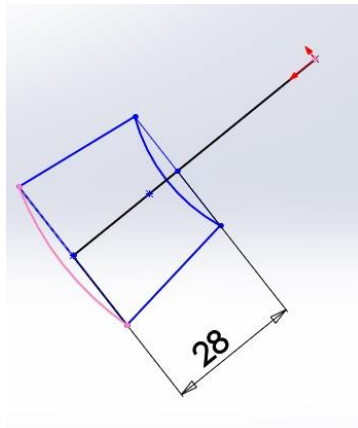
Pemodelan *shaft* menggunakan fitur *revolve*, dengan desain awal 2D. Kemudian dengan fitur tersebut desain diputar 360^0 sehingga diperoleh hasil desain *shaft*. Berikut desain *shaft* ditujukan pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Hasil Akhir Desain *Shaft*

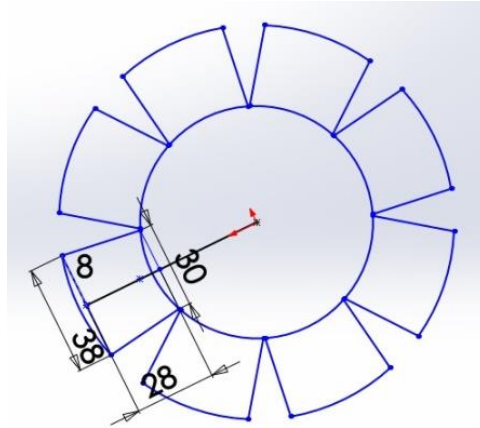
3.3.4 Pemodelan Magnet

Tahap awal untuk pemodelan permanen magnet ialah dengan desain sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Dimana parameter magnet memiliki panjang sebesar 28 mm dan ketebalan magnet sebesar 5 mm. Pada Gambar 3.15 merupakan sketsa dasar dalam mendesain magnet.



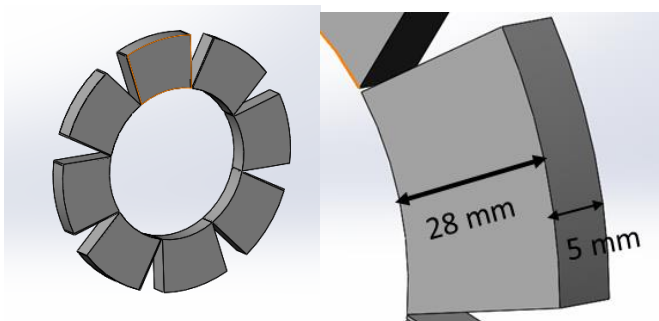
Gambar 3.15 Sketsa Dasar Desain Magnet

Kemudian dengan menggunakan fitur *circular sketch pattern* maka desain 2D akan diperbanyak dengan melingkari titik sumbu dan dapat ditentukan seberapa banyak gambar yang dibutuhkan. Sehingga sketsa dasar dapat dilihat pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16 Perbanyak Desain Menggunakan Fitur *Circular Sketch Pattern*

Tahap selanjutnya dalam pemodelan magnet setelah sketsa dasar ialah dengan menggunakan fitur *extrude* untuk memperoleh hasil desain 3 dimensinya. Sehingga hasil desain permanen magnet ialah pada Gambar 3.17.

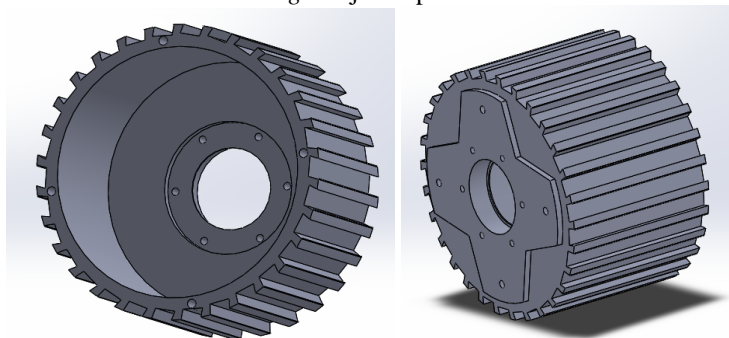


Gambar 3.17 Hasil Akhir Desain Magnet

3.3.5 Pemodelan *Casing*

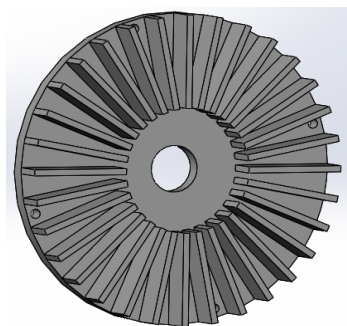
Pada pemodelan untuk pembuatan *casing* ditentukan berdasarkan kebutuhan parameter pada *core* stator dan *core* rotor.

Casing didesain untuk melindungi desain inti motor yaitu stator dan rotor. Berikut desain *casing* ditujukan pada Gambar 3.18.



Gambar 3.18 Hasil Akhir Desain *Casing*

Pemodelan *casing* dibuat banyak sirip pada sisi terluar bertujuan untuk sistem pendinginan sehingga mampu untuk mengurangi panas yang timbul dari motor. Berikut merupakan desain penutup *casing* yang juga menggunakan sirip pada sisi terluarnya yang ditujukan pada Gambar 3.19.

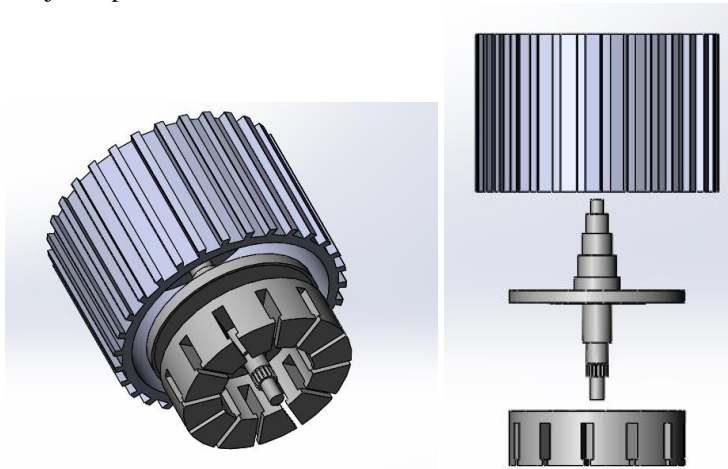


Gambar 3.19 Desain Penutup *Casing* Motor

3.3.6 *Assembly* (Penggabungan Desain)

Tahap terakhir dalam desain menggunakan *software Solidworks* ialah *assembly* (Penggabungan desain). Fitur yang digunakan yaitu *design mates* untuk mempermudah menggabungkan setiap komponen pada motor. Fitur ini dapat dipilih komponen mana saja yang dapat diputar maupun komponen yang statis. Dismaping itu

pada tahap *assembly* ini dapat pula ditentukan jarak *air gap* pada desain motor. Berikut hasil akhir desain akhir menggunakan *Solidworks* ditujukan pada Gambar 3.20



Gambar 3.20 Hasil Akhir Desain Setelah Melalui Proses *Assembly*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN ANALISIS DATA

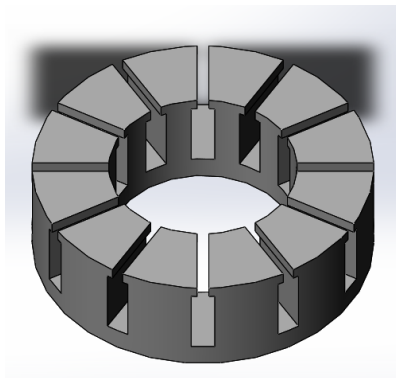
Pada bab ini dibahas mengenai hasil desain, analisa 2D dan analisa 3D dari hasil simulasi yang didapatkan dari parameter *axial flux permanent magnet* motor BLDC. Desain didapatkan melalui pemodelan pada *software Solidworks* dan *Ansys Maxwell*. Sedangkan analisa 2D dan 3D didapatkan pada *software Ansys Maxwell* dengan mendapatkan kurva karakteristik parameter kelistrikannya.

4.1 Hasil Desain Pemodelan *Axial Flux Permanent Magnet* Motor BLDC

Hasil desain dari parameter stator yang diperoleh direalisasikan dengan menggunakan *software Solidworks* dan *Ansys Maxwell*. Tujuan digunakannya dua *software* tersebut ialah untuk memvalidasi desain motor yang telah dirancang dan memudahkan pengguna untuk memperoleh hasil simulasi untuk menganalisa parameter pada rancangan motor tersebut.

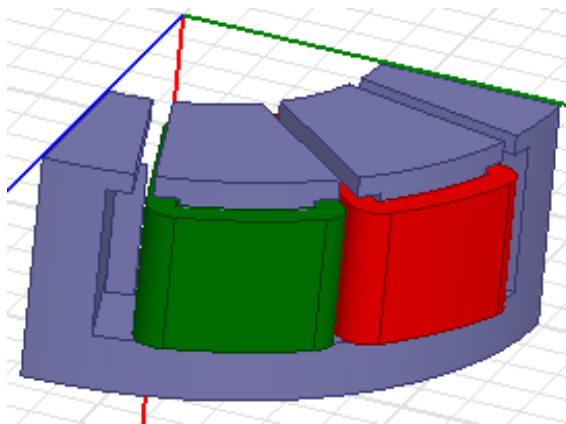
4.1.1 Desain dan Spesifikasi Stator

Berikut ini merupakan hasil desain stator dengan menggunakan *software Solidworks*. Hasil desain stator ditujukan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Desain Stator dengan *Solidworks*

Desain pada *Solidworks* dapat dikonversikan menjadi *blueprint* (cetakan). Desain *blueprint* dapat implementasikan langsung pada mesin pencetak. Selanjutnya ialah hasil desain stator menggunakan *software Ansys Maxwell* seperti pada Gambar 4.2.



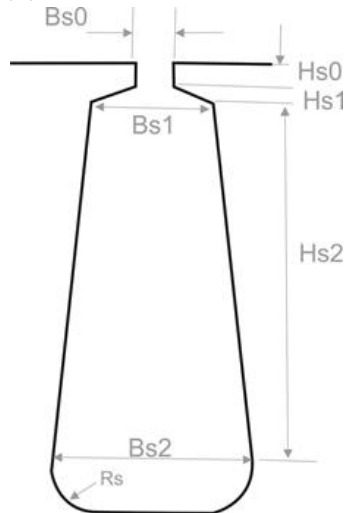
Gambar 4.2 Desain Stator dengan *Ansys Maxwell*

Berdasarkan dari perhitungan yang telah disimulasikan maka didapatkan parameter spesifikasi data dari stator. Berikut ini merupakan data spesifikasi pada stator. Data spesifikasi stator ditujukan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Spesifikasi Stator

Data Spesifikasi Stator	
Jumlah Pole	8
Jumlah Slot	12
Tipe Sirkuit	Y3
Diameter Luar	166 mm
Diameter Dalam	80 mm
Panjang	45 mm
Stacking Factor	0,95
Tipe Slot	3
Posisi Kontrol	Ya

Pada stator terdapat 12 slot yang memiliki tipe slot 3. Tipe slot merupakan faktor *constraint*. Dimana spesifikasi data slot pada stator ditujukan pada Tabel 4.2.



Gambar 4.3 Konstruksi Slot Stator

Tabel 4.2 Data Spesifikasi Slot Stator

Data Slot Stator	
Hs0	4 mm
Hs1	0 mm
Hs2	30 mm
Bs0	4 mm
Bs1	14 mm
Bs2	14 mm
Rs	0 mm

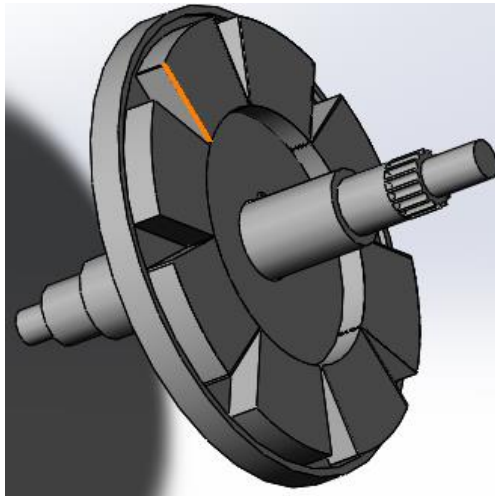
Winding atau belitan stator merupakan komponen penting pada stator yang digunakan untuk menghantarkan arus dan tegangan pada motot. Parameter desain yang diperoleh sehingga didapatkan data *winding* atau belitan yang optimal ditujukan pada Tabel 4.3 merupakan data spesifikasi pada *winding* stator.

Tabel 4.3 Data Spesifikasi *Winding* Stator

Data Spesifikasi <i>Winding</i> Stator	
<i>Type Winding</i>	Whole-Coiled
<i>Pararel Branches</i>	4
Jumlah Lilitan	48
Jumlah <i>Strands</i>	1
<i>Wire Wrap</i>	0,2
<i>Wire Size</i>	3,26 mm
Tipe Konduktor	<i>Copper</i>

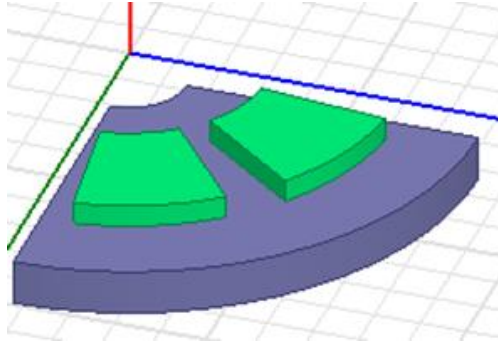
4.1.2 Desain dan Spesifikasi Rotor

Desain rotor pada motor *axial flux permanent magnet* motor BLDC terdiri dari *core* rotor dan magnet. Desain menggunakan *software Solidworks* dengan keluaran hasil *blueprint* (cetakan). *Blueprint* yang dihasilkan dapat digunakan langsung pada mesin pencetakan *core* rotor. Berikut hasil desain rotor ditujukan pada Gambar 4.4



Gambar 4.4 Desain Rotor dengan *Solidworks*

Desain selanjutnya menggunakan *software Ansys Maxwell*. Desain rotor ditujukan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Desain Rotor dengan *Ansys Maxwell*

Berdasarkan parameter yang didapatkan dari perhitungan sehingga dapat disimulasikan pada *software Ansys Maxwell*. Berikut ialah data spesifikasi pada *core* rotor. Data spesifikasi *core* pada rotor ditujukan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data Spesifikasi *Core* Rotor

Data Spesifikasi <i>Core</i> Rotor	
Jumlah <i>Pole</i>	8
Diameter Luar	166 mm
Diameter Dalam	25 mm
Panjang	10 mm
<i>Stacking Factor</i>	0,95
Tipe Material	D23_50
<i>Skew Width</i>	0,2 deg

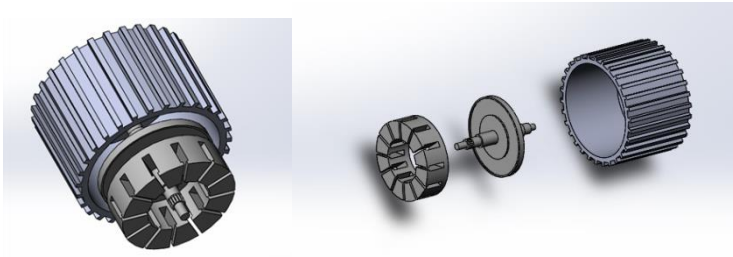
Disamping parameter *core* rotor, dalam desain rotor ditentukan juga parameter spesifikasi magnet. Magnet yang digunakan merupakan faktor *constraint*. Dimana data spesifikasi pada magnet ditujukan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Data Spesifikasi Magnet

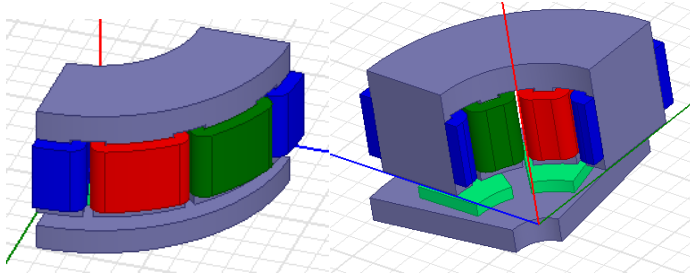
Data Spesifikasi Magnet	
Tipe Magnet	NdFe35
Panjang Magnet	28
Tebal Magnet	5

4.1.3 Desain Assembly

Berikut merupakan tampilan desain akhir dari proses penggabungan (*assembly*) desain 3D dari kedua *software* untuk pemodelan *axial flux permanent magnet* motor BLDC. Secara garis besar berikut merupakan penggambaran dari desain yang telah dirancang seperti Gambar 4.6 dan Gambar 4.7.



Gambar 4.6 Desain *Assembly* menggunakan *Solidworks*

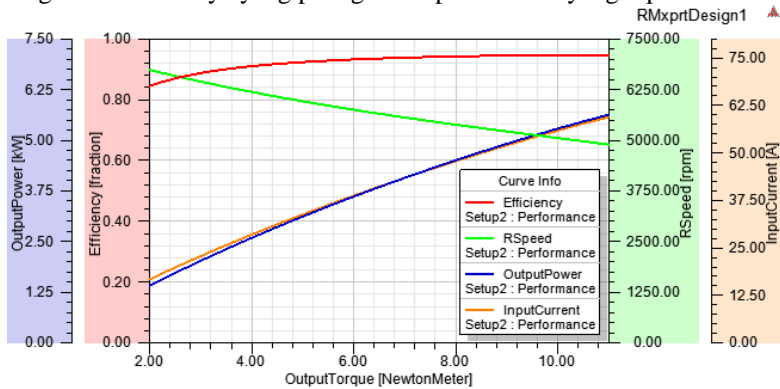


Gambar 4.7 Desain *Assembly* menggunakan *Ansys Maxwell*

4.2 Analisa Hasil Simulasi 2D terhadap Performansi Motor

Pemodelan desain melalui *software Ansys Maxwell* dapat dilakukan simulasi pada parameter motor, sehingga didapatkan karakteristik pada desain motor yang telah dirancang. Pada analisa ini akan dibahas terkait simulasi dua dimensi yang menghasilkan karakteristik performansi pada desain motor. Pada simulasi ini, didapatkan hasil kurva dengan parameter efisiensi, kecepatan, arus, dan daya terhadap pembebanan. Pada kurva karakteristik efisiensi, kecepatan, arus, dan daya terhadap

pembebanan menunjukkan fungsi kecepatan yang terbaik pada motor dengan keluaran daya yang paling stabil pada desain yang diperoleh.



Gambar 4.8 Kurva Karakteristik Efisiensi, Kecepatan Arus dan Daya terhadap Pembebanan

Pada Gambar 4.8 kurva karakteristik tersebut didapatkan karakteristik yang sudah mendekati dengan perhitungan yang diharapkan. Saat kecepatan mencapai 5050 rpm kurva karakteristik menunjukkan daya sebesar 5100 Watt dengan efisiensi sebesar 94,49% dan arus sebesar 54,3 A saat pembebanan sebesar 9,5 Nm.

Hasil simulasi efisiensi, kecepatan, arus, dan daya terhadap pembebanan dilakukan dengan menggunakan fitur *chopping current control* (CCC) yang membatasi arus dengan arus maksimal sebesar 240 A dan arus minimal sebesar 5 A. Simulasi dilakukan dalam keadaan *full load*. Daya pada kurva mengalami penurunan setelah melewati kecepatan rating hal ini dikarenakan torsi beban perlahan mulai menghilang seiring dengan bertambahnya kecepatan.

Sedangkan kurva karakterisk efisiensi terhadap pembebanan menunjukkan efisiensi yang semakin meningkat seiring dengan bertambahnya pembebanan pada motor. Berdasarkan hasil simulasi nilai efisiensi didapatkan dari persamaan berikut.

$$P_{out} = 5 \text{ kW} = 5000 \text{ W}$$

$$P = VI \tag{4.1}$$

$$I = \frac{5000 \text{ W}}{100 \text{ V}} = 50 \text{ A}$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{losses} \quad (4.2)$$

$$P_{in} = P_{out} + (P_{fw} + P_{cua} + P_{fe} + P_b) \quad (4.3)$$

P_{out} adalah daya keluaran

P_{in} adalah daya masukan

P_{fw} adalah rugi-rugi *friction* dan *windage*

P_{cua} adalah rugi-rugi tembaga

P_{fe} adalah rugi-rugi *core*

P_b adalah rugi-rugi transistor dan dioda

$$P_{in} = 5000 + (21,46 + 30,48 + 134,67 + 104,76)$$

$$P_{in} = 5291,37 \text{ W}$$

Maka efisiensi,

$$Efisiensi = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4.4)$$

$$Efisiensi = \frac{5000}{5291,37} \times 100\%$$

$$Efisiensi = 94,49\%$$

Penentuan nilai torsi dan arus dapat dihitung dengan mengestimasi kecepatan berkisar 5000 rpm. Nilai arus yang mengalir pada motor dengan nilai tegangan konstan 100 volt berdasarkan persamaan :

$$P = VI \quad (4.5)$$

$$I = \frac{5000 \text{ W}}{100 \text{ V}} = 50 \text{ A}$$

Torsi yang mengalir pada motor dapat ditentukan berdasarkan nilai kecepatannya. Sehingga pada motor 5 kW akan mengalir torsi dengan persamaan berikut.

$$f = \frac{5000 \text{ rpm}}{60 \text{ detik}}$$

$$f = 83,33 \text{ Hz}$$

Frekuensi yang dihasilkan pada kecepatan 5000 rpm yaitu berkisar 83.33 Hz. Sehingga dapat diketahui kecepatan sudut sebesar pada perhitungan sebesar:

$$\omega = 2 (3,14)(83,33)$$

$$\omega = 523,33 \text{ rad/s}$$

Kecepatan sudut didapatkan sebesar 523,33 rad/s sehingga dapat dihitung nilai torsi sebesar

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (4.6)$$

$$T = \frac{5000 \text{ watt}}{523,33 \text{ rad/s}}$$

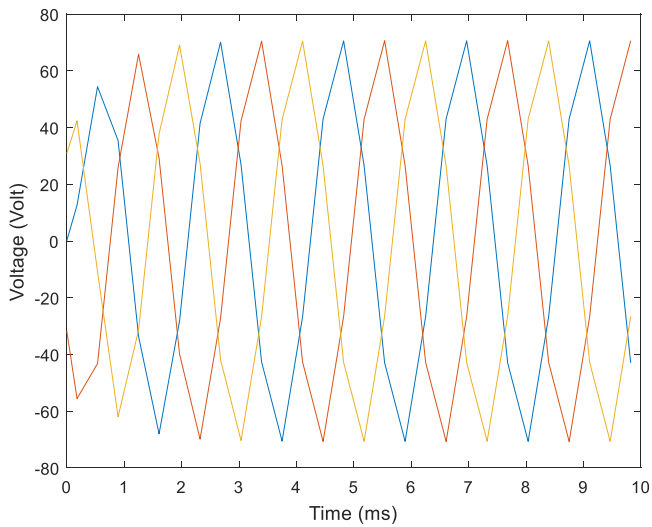
$$T = 9,55 \text{ Nm}$$

4.3 Analisa Hasil Simulasi 3D *Transient* Motor

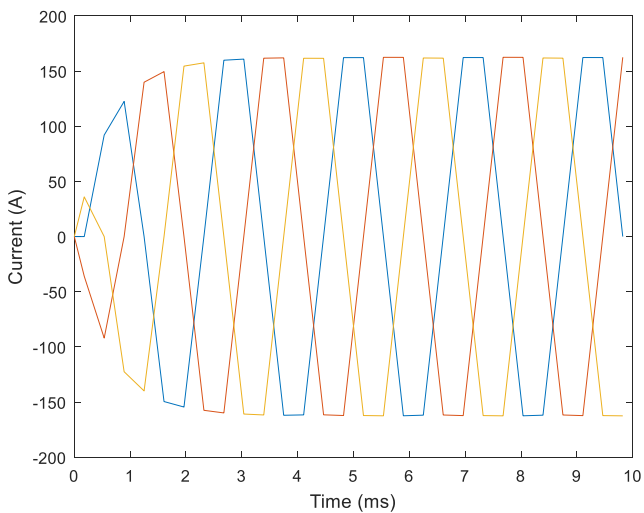
Pemodelan desain melalui *software Ansys Maxwell* dapat dilakukan simulasi terhadap desain tiga dimensi, sehingga didapatkan karakteristik pada desain motor yang telah dirancang berupa arus, tegangan, torsi, kerapatan fluks, arah medan, serta rugi-rugi. Simulasi 3D dilakukan saat motor dalam kondisi *full load* dengan kecepatan konstan pada 5000 rpm. Pada analisa ini akan dibahas terkait simulasi tiga dimensi yang menghasilkan karakteristik berikut.

4.3.1 Karakteristik Arus dan Tegangan Masukan Motor

Pada simulasi ini dilakukan dalam kondisi *full load*, didapatkan nilai arus dan tegangan tiga fasa dimana nilai arus maksimal sebesar 160 A dan tegangan 75 Volt. Disamping itu, karakteristik gelombang fasa memiliki perbedaan sudut sebesar 120^0 , Arus dan tegangan motor dipengaruhi oleh sumber dari *controller* dimana sumber DC yang di *setting* sebesar 100 Volt DC. Arus yang keluar dari *controller* bergantung terhadap jumlah lilitan pada stator yang berguna menghasilkan medan listrik. Arus dan tegangan yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11.



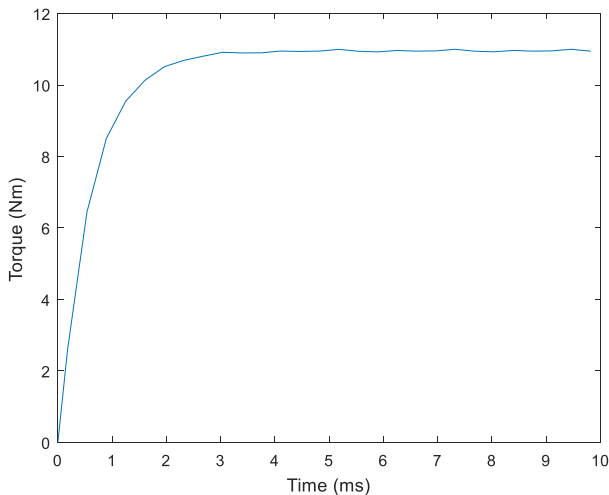
Gambar 4.9 Kurva Tegangan terhadap Waktu Selama 10 ms



Gambar 4.10 Kurva Arus terhadap Waktu Selama 10 ms

4.3.2 Kurva Karakteristik Torsi terhadap Waktu

Pada simulasi didapatkan kurva karakteristik torsi terhadap waktu. Nilai torsi yang didapatkan pada simulasi merupakan nilai torsi saat kecepatan 5000 rpm. Sehingga dapat dilihat pada kurva torsi naik saat *start* kemudian torsi konstan pada waktu berikutnya dikarenakan motor dioperasikan pada kecepatan yang tetap. Berikut Gambar 4.12 yang merupakan kurva torsi terhadap waktu.



Gambar 4.11 Torsi terhadap Waktu Selama 10 ms

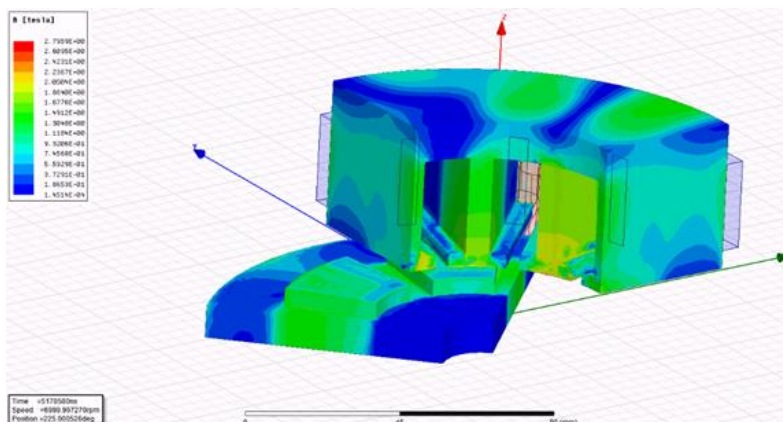
Pada kurva torsi terhadap waktu pada grafik didapatkan hasil simulasi dengan rata-rata nilai torsi sebesar 10.95 Nm (diambil pada detik 5-10 ms saat *steady state*). Sedangkan nilai torsi secara analitis saat desain bernilai 9,55 Nm. Kesalahan ini terjadi akibat kesalahan analisis pada perangkat lunak yang menggunakan metode berbasis 3D *finite element methods* [5]. Sehingga didapatkan *error* simulasi sebesar 9,95%. *Error* pada simulasi ini masih dianggap dapat di toleransi.

$$Error = \frac{10.95 - 9.55}{9.55} \times 100\%$$

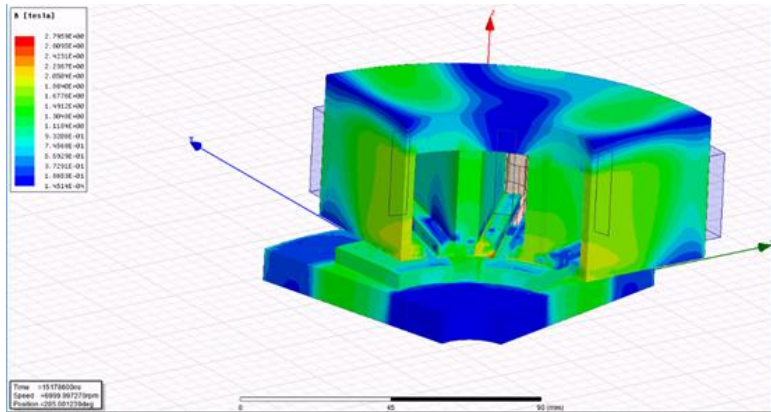
$$Error = 9,95\%$$

4.3.3 Karakteristik Kerapatan Fluks

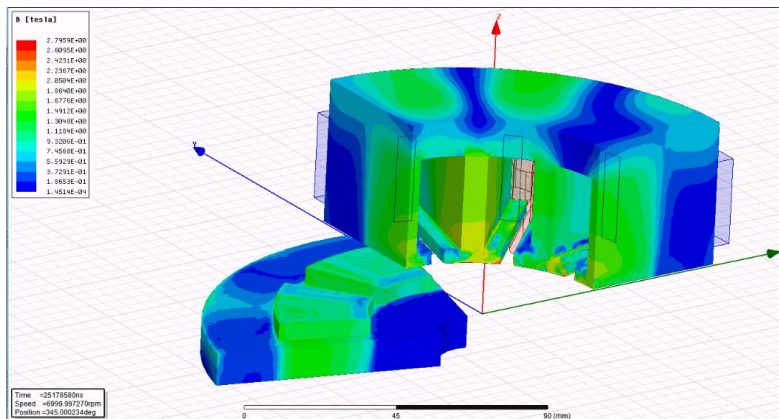
Pada simulasi animasi kerapatan fluks, medan magnet yang ditimbulkan disebabkan oleh perubahan fluks terhadap kumparan pada stator. Nilai kerapatan fluks didapatkan hasil maksimal sebesar 2,7 T. Pada animasi didapatkan besarnya kerapatan fluks dimana nilai aman (*safety*) diberi indikator warna biru hingga yang paling buruk ditandai dengan indikator warna merah. Motor memiliki persebaran distribusi fluks dengan warna dominan biru pada permukaan luas penampang stator yang mengindikasikan motor dapat beroperasi dengan optimal. Disamping itu distribusi persebaran fluks cenderung lebih kuat pada bagian *inner* (dalam) stator dengan warna dominan hijau dan kuning, serta sedikit yang mengindikasikan warna merah yang terdapat pada titik-titik sudut *core* stator.



Gambar 4.12 Simulasi Kerapatan Fluks saat 5 ms



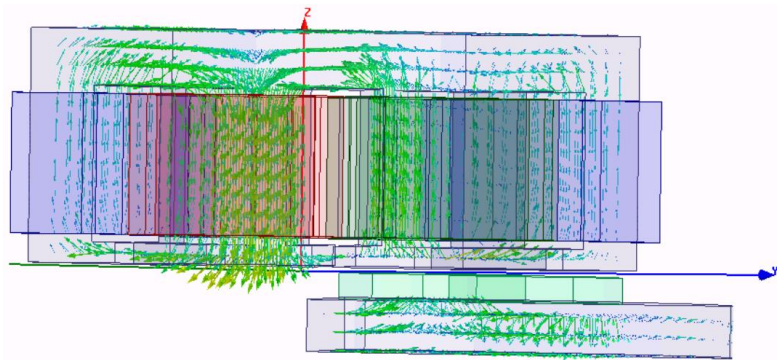
Gambar 4.13 Simulasi Kerapatan Fluks saat 15 ms



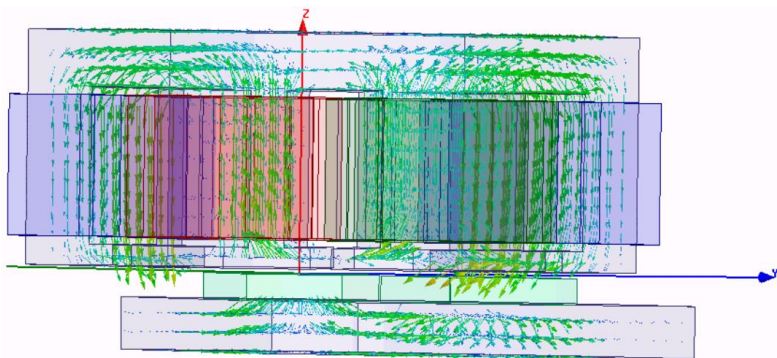
Gambar 4.14 Simulasi Kerapatan Fluks saat 30 ms

4.3.4 Karakteristik Arah Medan

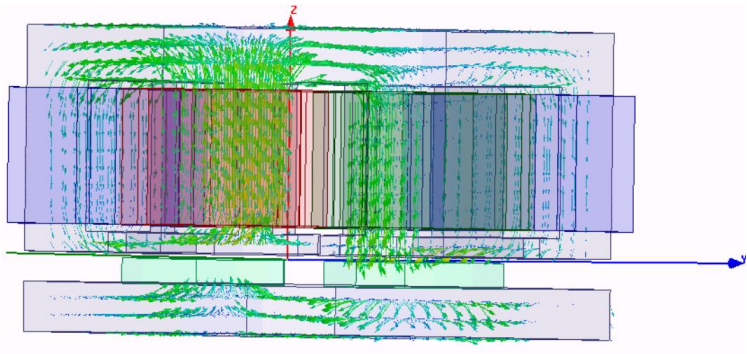
Pada simulasi berikut ditampilkan arah arus medan dari motor. Dapat dilihat pada animasi didapatkan arah berjalannya arus pada stator dan rotor yang ditampilkan dengan garis-garis berwarna hijau. Pada stator arah medan akan bergerak menuju sumbu Z dan kembali lagi ke titik semula, sedangkan pada rotor arah medan keluar menuju kearah luar magnet. Simulasi pada arah medan dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.15 Simulasi Arah Medan saat 5 ms



Gambar 4.16 Simulasi Arah Medan saat 15 ms



Gambar 4.17 Simulasi Arah Medan saat 30 ms

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Desain *axial flux permanent magnet* motor BLDC memiliki daya keluaran sebesar 5 kW pada kecepatan 5000 rpm.
2. Konstruksi desain *axial flux permanent magnet* motor BLDC memiliki spesifikasi ukuran diameter luar *core* stator sebesar 166 mm dan diameter dalam *core* stator sebesar 80 mm dengan jumlah slot stator 12 dan jumlah *pole* rotor 8 kutub.
3. Desain *axial flux permanent magnet* motor BLDC memiliki diameter kawat untuk lilitan sebesar 3,26 mm dengan jumlah lilitan pada stator sebanyak 48 lilitan.
4. Dari rancangan motor didapatkan nilai pada kecepatan konstan 5000 rpm dengan torsi output mekanis sebesar 10,95 Nm. Sedangkan arus masukan motor maksimal sebesar 160 A dan tegangan masukan maksimal sebesar 75 Volt.
5. Desain *axial flux permanent magnet* motor BLDC memiliki efisiensi sebesar 94,49% berdasarkan hasil simulasi.

5.2 Saran

1. Paramater-parameter dalam perancangan desain motor dapat dijadikan topik sendiri untuk penelitian guna meningkatkan performa motor seperti struktur tipe slot, *winding* stator, penentuan optimasi perbaikan *cogging torque* dan *airgap* serta parameter lainnya.
2. Desain yang telah dirancang dapat menjadi acuan untuk implementasi maupun penelitian perancangan desain selanjutnya.
3. Hasil desain yang telah diperoleh dapat dilakukan validasi dengan dilakukan pengujian terhadap implementasi desain.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pinaki Mukherjee dan Mainak Sengupta, "Design, Analysis and Fabrication of a Brush-less DC Motor," *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2014.
- [2] Sreeju S Nair, Shamsudden Nalakath, dan Samraj Jabez Dhinagar, "Design and Analysis of Axial Flux Permanent Magnet BLDC Motor for Automotive Applications," *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011.
- [3] Duane C. Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design," Magna Physics Publishing, 2006.
- [4] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, dan Maarten J. Wamper, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines," Springer, 2008.
- [5] Ertugrul Yesilbag, Yasemin Ertugul, dan Lale Ergene, "Axial Flux PM BLDC Motor Design Methodology and Comparison with a Radial Flux PM BLDC Motor," *TUBITAK*, 25: 3455-3467, 2017.
- [6] Kurtuluş Yılmaz, "Comparison of Axial Flux and Radial Flux Brushless DC Motor Topologies for Control Moment Gyroscope Wheel Applications," *Middle East Technical University*. 2009
- [7] Yee Pien Yang dan Guan Yu Shih, "Optimal Design of an Axial-Flux Permanent Magnet Motor for an Electric Vehicle Based on Driving Scenarios," *Energies*. 2016
- [8] Gede Bayu Anugrah Janardana, "Desain dan Analisis Motor Axial Flux Brushless DC Berbasis 3D Finite Element Method untuk Aplikasi Kendaraan Listrik," *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 2015.

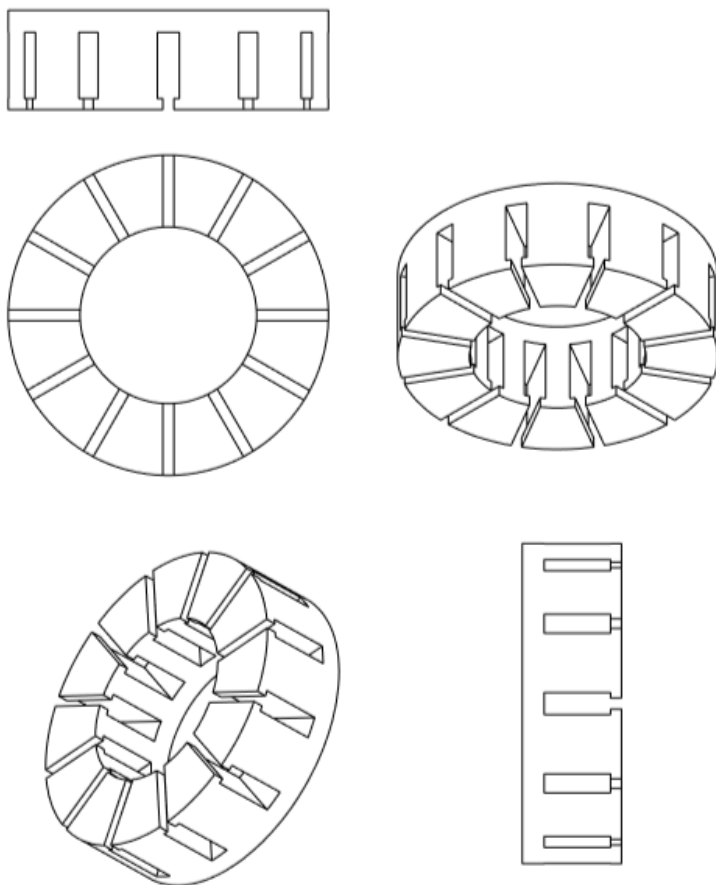
[9] Ayuning Fitri Desanti, “Rancang Bangun dan Uji Performa Motor Listrik Brushless DC Axial dengan Daya 25 kW ,” *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 2015.

[10] Amin Mahmoudi, Solmaz Kahourzade, Nasrudin Abd Rahim, dan Wooi Ping Hew, “Design, Analysis and Prototyping of an Axial-Flux Permanent Magnet Motor Based on Genetic Algorithm and Finite Element Analysis,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 49, 2013.

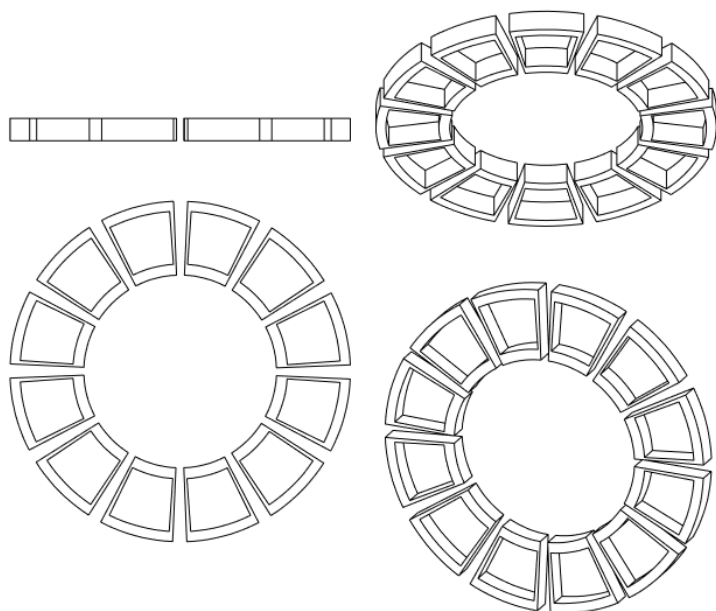
[11] Abdolamir Nekoubin, “Design a single-phase BLDC Motor and Finite Element Analysis of Stator Slots Structure Effects on the Efficiency,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 5, 2011.

LAMPIRAN

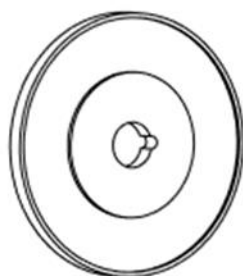
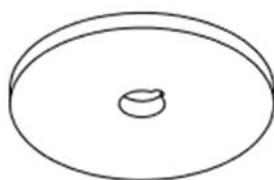
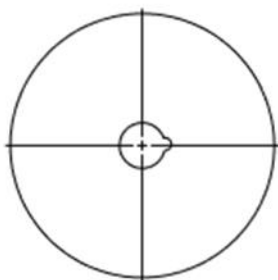
Lampiran 1. Blueprint Stator



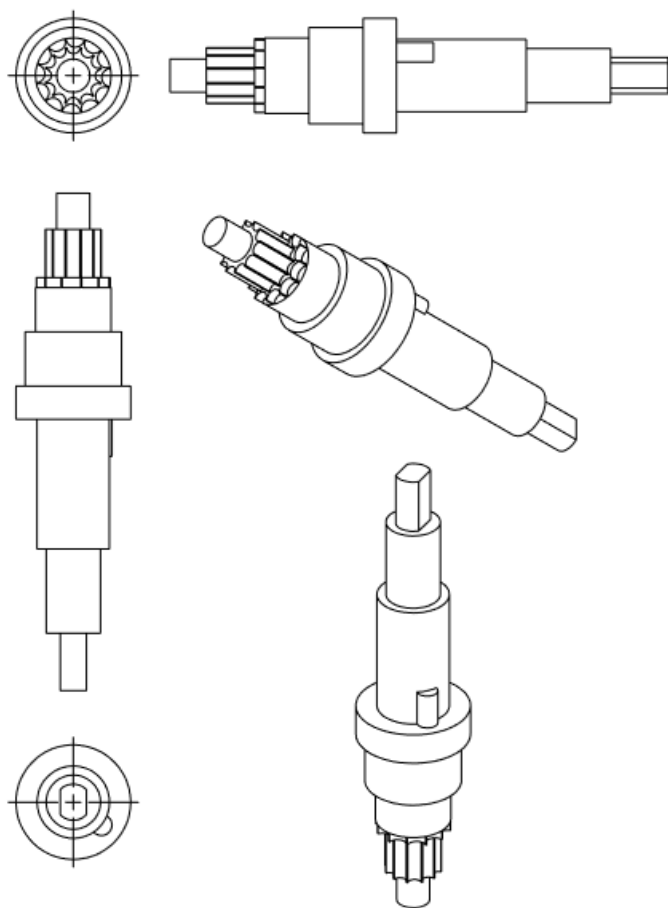
Lampiran 2. Blueprint *Winding*



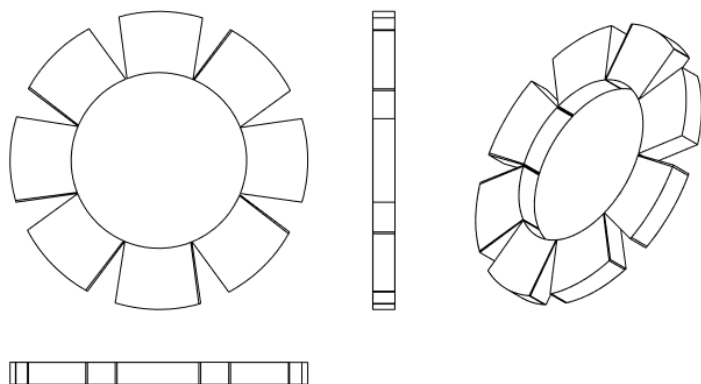
Lampiran 3. *Blueprint Core Rotor*



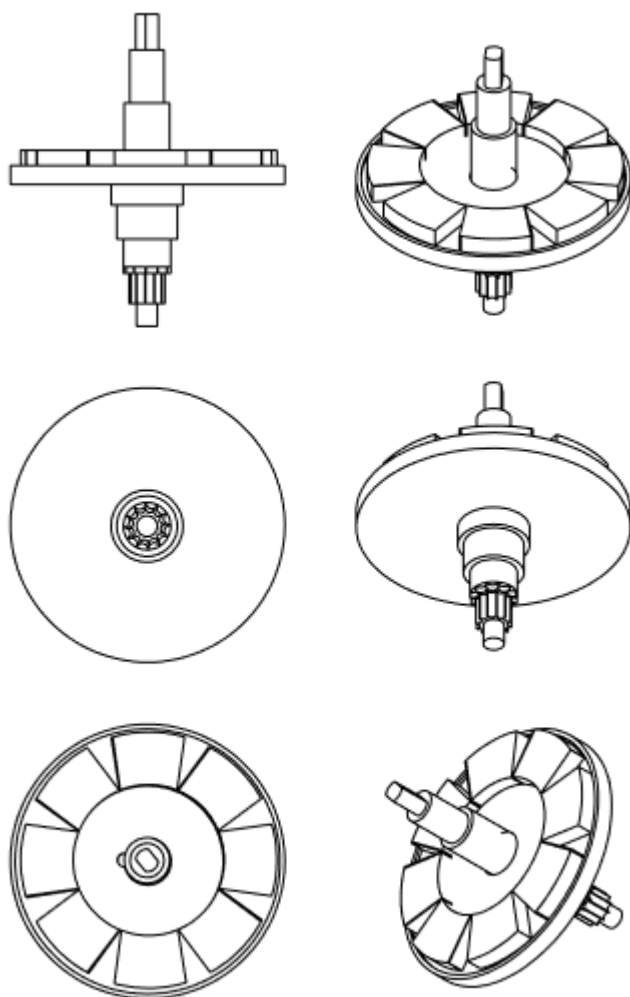
Lampiran 4. *Blueprint Shaft*



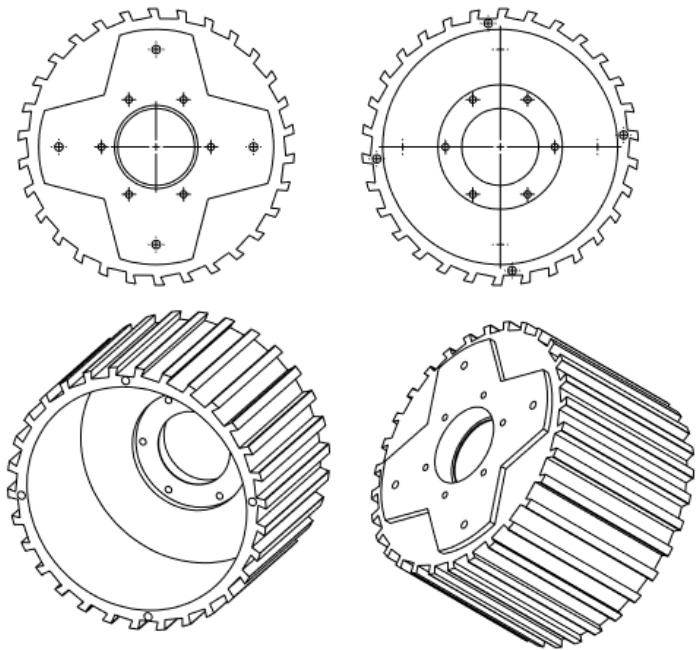
Lampiran 5. Blueprint Magnet



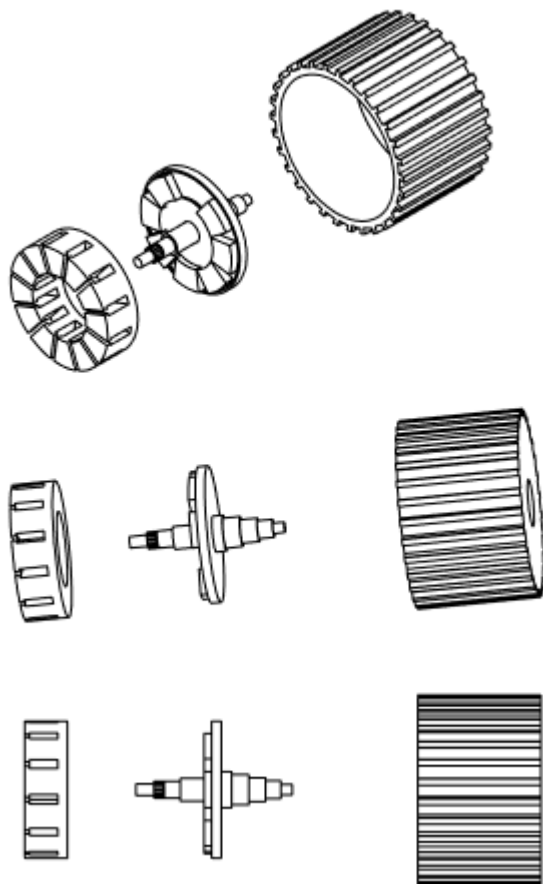
Lampiran 6. Blueprint Rotor Keseluruhan



Lampiran 7. *Blueprint Casing*



Lampiran 8. Blueprint Assembly Motor



RIWAYAT PENULIS



Penulis bernama Herviyandi Herizal, lahir di Jakarta, 21 April 1995. Merupakan anak keempat dari empat bersaudara. Penulis menamatkan pendidikan dasarnya di SDN Pegangsaan Dua 05 Pagi, melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMPN 99 Jakarta, dan pendidikan menengah akhir di SMAN 68 Jakarta. Saat ini penulis telah menempuh kuliah di Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama masa perkuliahan penulis aktif dalam beberapa kegiatan non akademis yaitu pada bidang keilmiah dan organisasi. Penulis sempat menjadi Sekertaris Departemen Riset dan Keilmiah Himatektro ITS dan Kepala Divisi Syiar Kalam Lembaga Dakwah Jurusan. Disamping itu penulis juga mengikuti kompetisi dan konferensi baik nasional maupun internasional dan penulis juga aktif menjadi pembicara pada kegiatan pelatihan karya tulis ilmiah.

Email : herviyandiherizal@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan